

На правах рукописи

СЫСА Павел Анатольевич

УДК 622.778

ПОВЫШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ
МАГНЕТИТОВЫХ КВАРЦИТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО СЕПАРАТОРА С
НИЗКОИНТЕНСИВНЫМ ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ
ПОЛЕМ

Специальность 25.00.13 – «Обогащения полезных ископаемых»

Научный руководитель:
проф., докт. техн. наук

В.В.Кармазин

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Анализ технологических схем, процессов и аппаратов, применяемых для получения высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям бездоменной металлургии	12
1.1 Технологии дообогащения магнетитовых концентратов	14
1.2 Анализ конструкций магнитных сепараторов, применяемых для получения высококачественных концентратов	21
1.3 Выводы	38
Глава 2. Повышение селективности магнитного обогащения железорудных концентратов на основе управления процессом магнитной флокуляции	40
2.1 Анализ процесса флокуляции при обогащении во вращающихся магнитных полях	40
2.2 Исследования возможности получения высококачественных магнетитовых концентратов с помощью высокоградиентной сепарации в слабом переменном магнитном поле	48
Глава 3. Теоретический анализ процесса высокоградиентной сепарации в слабом переменном магнитном поле	55
3.1 Закономерности разделения магнитных частиц в рабочей зоне сепаратора ВГСНПМП	57
3.2 Гидродинамика движения пульпы в высокоградиентных средах	69
3.3 Анализ моделей процесса высокоградиентной магнитной сепарации	75
3.4 Моделирование процесса ВГСНПМП	88
Глава 4. Разработка конструкции и испытания сепаратора ВГСНПМП	91
4.1 Характеристика исходного материала	91

4.2 Разработка конструктивных параметров сепаратора	93
4.2.1 Выбор формы и размеров элементов высокоградиентной матрицы сепаратора.	93
4.2.2. Расчет высоты рабочей зоны сепаратора	98
4.2.3. Удельная емкость шаровой матрицы.	99
4.2.4. Расчет параметров массопереноса в рабочей зоне	101
4.3 Определение режимных параметров сепарации	106
4.3.1.Определение оптимальной напряженности магнитного поля в рабочем зазоре.	106
4.3.2 Определение оптимального содержания твердого в питании	108
4.3.3 Расчет шаровой загрузки сепаратора.	111
4.4 . Конструкция экспериментального сепаратора ВГСНПМП	113
4.5. Испытания экспериментального образца сепаратора ВГСНПМП	114
4.5.1. Результаты обогащения концентрата МГОКа на сепараторе ВГСНПМП	114
4.5.2. Определение сепарационных характеристик и ожидаемых показателей обогащения сепаратора ВГСНПМП	117
4.5.3. Проверка адекватности математической модели процесса ВГСНПМП	122
4.5.4. Выводы	125
Глава 5. Рекомендуемая технология обогащения магнетитовых кварцитов МГОКа на основе применения сепаратора ВГСНПМП	125
Заключение	131
Список литературы	134

Введение

Актуальность работы. Россия занимает одно из ведущих мест в мировом балансе железорудного сырья по запасам, производству, потреблению и экспорту продукции [24]. Прогнозные ресурсы РФ оцениваются в 160 млрд. т. со средним содержанием железа 35,8% [21, 81]. Истощение запасов богатого сырья привело к тому, что в настоящее время основное промышленное значение имеют магнетитовые руды с содержанием 31-35% железа, отличающиеся тонкой вкрапленностью рудных и нерудных минералов, из которых методом многостадийной магнитной сепарации получают концентраты с содержанием 65-68% железа и 7-9% кремнезема [1].

В то же время во всех регионах мира быстрыми темпами развиваются технологии бездоменной металлургии. Статистические выкладки говорят о том, что производство железа прямого восстановления за последние 10 лет возросло более чем на 60% [1, 61].

Эта тенденция стимулируется следующими причинами:

- растут требования к качеству стали;
- кокс и коксующиеся угли все более труднодоступны, при этом есть огромные запасы природного газа и относительно дешевая электроэнергия;
- основное количество серы и фосфора попадает в чугуны при доменном переделе и ухудшает качество стали.

Производство первичного металла в агрегатах бездоменной металлургии существенно отличается от доменного производства. Способ весьма экономичен. Отпадают затраты на коксохимическое производство. Производительность бездоменных процессов заметно выше традиционных способов выплавки стали из чугуна.

Главным сдерживающим фактором для развития бездоменной металлургии в РФ является ограниченность сырьевой базы вследствие жестких требований к содержанию кремнезема в концентрате, которое

должно быть не более 3-3,5%. Этим требованиям соответствуют только железорудные суперконцентраты Лебединского и Оленегорского ГОКов.

Низкое качество железорудных концентратов поддерживает в странах СНГ технологию XIX в. – доменное производство. Удаление одной тонны кварца в шлак требует две тонны кокса и половину тонны флюсов. По себестоимости это составляет до 50 USD на тонну кварца, хотя для обогатительных фабрик затраты на удаление тонны кварца не превышают 5 USD, а удаление SiO_2 до уровня менее 3% открывает дорогу самым современным бездоменным процессам черной металлургии [40, 64, 65].

При содержании $\text{Fe}_{\text{общ}}$ менее 64% концентрат можно продать только как аглоруду. При достижении содержания $\text{Fe}_{\text{общ}}$ 70% цена концентрата значительно возрастает. На экспорт сейчас можно поставлять продукцию только с содержанием 68 – 70% $\text{Fe}_{\text{общ}}$, что говорит о том, что нижней границей качества железорудного концентрата на сегодняшний день является содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ 68%.

В Российской Федерации магнитное обогащение неизменно остается технологической основой использования руд черных металлов. Месторождение Курской магнитной аномалии (КМА) имеет самые большие в мире запасы магнетитовых руд - свыше 22 млрд.т. Здесь работают четыре горно-обогатительных комбината: Лебединский, Стойленский, Михайловский и Белгородский; Яковлевский рудник и объединение КМА-руда, которые производят более 30 млн. т/год концентратов. С начала 80-х годов функционирует Оскольский электрометаллургический комбинат, не имеющий доменных печей и являющийся одним из наиболее крупных подобных заводов в мире. При Лебединском ГОКе работают уже три установки горячего брикетирования железа.

Одним из путей решения проблемы повышения качества концентратов является создание новых сепараторов, позволяющих селективно разделять чистые зерна минералов от сростков с пустой породой. Перспективной разработкой является высокоградиентный сепаратор ВСПБМ 90/100,

созданный в НТЦ МГГУ ГОМУ под руководством профессора В.В. Кармазина. Сепаратор показал хорошие результаты в схемах стадийного выделения концентратов и дообогащения товарных концентратов Лебединского и Михайловского ГОКов, но, при доводке концентрата на МГОКе, повышение качества сопровождалось существенным снижением извлечения $Fe_{\text{общ}}$ в концентрат [3, 4, 27, 37].

Дальнейшее совершенствование технологии магнитного обогащения и создание новых конструкций высокоградиентных сепараторов, обеспечивающих повышение качества магнетитовых концентратов, является актуальной проблемой.

Диссертационная работа посвящена решению задачи повышения эффективности магнитной сепарации сильномагнитных руд, при производстве суперконцентратов для бездоменной металлургии, на основе предложенного автором нового процесса высокоградиентной магнитной сепарации в переменном магнитном поле с низкой напряженностью (ВГСНППМ).

Научной основой диссертации явились результаты исследований магнитной сепарации железных руд, значительный вклад в развитие которых внесли ведущие ученые: В.Г. Деркач, В.С. Замыцкий, В.И. Кармазин, В.В. Кармазин, Л.А. Ломовцев, П.Е. Остапенко, И.Н. Плаксин, Ян Свобода и др.[20, 29, 41 - 45, 49,64, 75, 76, 110 - 112, 114– 116, 118 - 120.]

Цель работы. Получение суперконцентратов с содержанием общего железа ($Fe_{\text{общ}}$) 69% и выше на основе магнитной сепарации в слабом переменном магнитном поле (напряженностью менее 20 кА/м).

Идея работы. Повышение селективности обогащения магнетитовых кварцитов на основе применения высокоградиентного сепаратора с низкоинтенсивным переменным магнитным полем для получения высококачественных концентратов по схемам магнитного обогащения железорудных ГОКов.

Задачи исследований:

- анализ работающих технологических схем обогащения железорудных ГОКов и применяемых на них современных обогатительных процессов и аппаратов;

- теоретический анализ основных закономерностей высокоградиентной сепарации в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПМП) с целью выявления параметров, оказывающих влияние на селективность разделения сильномагнитных концентратов;

- разработка математической модели нового процесса ВГСНПМП, объективно отражающей закономерности разделения магнитных частиц при его использовании, позволяющей определить основные конструктивные и технологические параметры сепаратора ВГСНПМП.

- разработка устройств для стендовых и лабораторных испытаний метода высокоградиентной магнитной сепарации в переменном магнитном поле при разделении сильномагнитных минералов;

- определение основных конструктивно-технологических параметров ВГСНПМП - сепаратора непрерывного действия и выдача предложений и рекомендаций по его использованию в технологических схемах для получения высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям к сырью для бездоменной металлургии.

Объектами исследований являлись конструктивно-технические и технологические параметры процессов и аппаратов высокоградиентной мокрой магнитной сепарации в слабом переменном магнитном поле (ВГСНПМП) для доводки магнетитовых концентратов железорудных ГОКов.

Методы исследований:

- магнитные, химические, гравитационные методы анализа исходных материалов и продуктов разделения;

- моделирование процесса сепарации в лабораторных условиях;

- теоретический анализ конструктивно-технологических параметров процесса ВГСНПМП на основе его математической модели;

- анализ результатов, полученных в ходе лабораторных испытаний с использованием компьютерной обработки в современных программах Statistica, Ansys и др.

В экспериментах использовались специальные и стандартные измерительные устройства и приборы.

Научная новизна работы

1. Установлен механизм повышения селективности магнитной сепарации, возникающий в высокоградиентной среде в результате воздействия переменного магнитного поля низкой интенсивности, заключающийся во вращательном и поступательном движении магнитных частиц разделяемой смеси в местах высокого градиента магнитного поля. Этот эффект обусловлен тем, что в результате наличия гистерезиса перемагничивания у частиц магнетита, в момент изменения полярности поля извлекающая магнитная сила кратковременно принимает противоположное направление. Впервые для предотвращения флокуляции с целью повышения качества магнетитового концентрата применено переменное магнитное поле частотой 50 Гц и напряженностью не выше 20 кА/м в сочетании с высокоградиентной извлекающей матрицей.

2. Разработана математическая модель, описывающая новый процесс высокоградиентной сепарации в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПМП), включающая системы уравнений, отображающих зависимости технологических параметров процесса ВГСНПМП, его граничные условия и учитывающая функции распределения частиц по величине удельной магнитной восприимчивости (содержания $Fe_{общ}$) в исходном питании. Получены сепарационные характеристики и зависимости основных показателей обогащения от влияния параметров поля.

3. Впервые изучено теоретически и практически проверено воздействие переменного магнитного поля на работу матриц различной конфигурации (шаровых и цилиндрических), в результате чего установлено, что лучшее качество магнетитового концентрата достигается при применении шаровой

матрицы, что позволяет достичь содержания $69\% Fe_{общ}$ и выше при помощи магнитного метода сепарации. Выявлено, что оптимальным значением напряженности переменного поля является 9-15 кА/м.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработан новый процесс высокоградиентной сепарации в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПМП), отличающийся применением высокоградиентных осадительных матриц, находящихся в переменном магнитном поле (частота 50Гц) малой напряженности (до 20 кА/м); установлен рабочий диапазон его основных технологических параметров; выявлен механизм удаления богатых сростков из слоя магнетитового концентрата, заключающийся в повышении подвижности осажденного слоя концентрата вследствие переориентации вектора извлекающей магнитной силы в момент смены полярности поля, также в результате использования гистерезиса перемагничивания магнетита, обеспечивающих высокоселективное разделение сильномагнитных материалов.

2. Создана математическая модель, описывающая новый процесс высокоградиентной магнитной сепарации в слабом переменном магнитном поле (ВГСНПМП), включающая систему уравнений, описывающих зависимости технологических параметров процесса ВГСНПМП и его граничные условия, на основе которой получены зависимости показателей обогащения от параметров поля, подтвержденные экспериментальными данными. Модель позволяет рассчитать напряженность магнитного поля, его градиент, скорость подачи пульпы и установить эффективные параметры обогащения для процесса ВГСНПМП;

3. Создан непрерывно действующий экспериментальный сепаратор ВГСНПМП, включающий электромагнитную систему, кольцевую высокоградиентную осадительную матрицу с большой осадительной поверхностью и небольшой глубиной зоны захвата, необходимой для удерживания частиц с наиболее высокой магнитной проницаемостью, а также

привод и устройства загрузки и выгрузки продуктов обогащения; который позволяет при доводке рядового магнетитового концентрата получить суперконцентрат, содержащий более 69% Fe_{общ} при производительности по исходному питанию не менее 10 кг/ч.

Практическая значимость работы заключается в определении технологических параметров сепаратора ВГСНПМП, разработке технологического процесса, основанного на применении сепаратора ВГСНПМП, позволяющего доводить магнетитовые концентраты до содержания Fe_{общ} 69% и выше по магнитной схеме без использования флотационной доводки, который может быть рекомендован для внедрения на Михайловском ГОКе. Получено положительное решение Федеральной службы по интеллектуальной собственности о выдаче патента по заявке №2014114166/03(022119) на авторские права по процессу ВГСНПМП.

Личный вклад автора состоит в постановке проблемы, анализе современного состояния производства высококачественных магнетитовых концентратов, формулировке задач исследования, установлении механизма гистерезисного взаимодействия материала с переменным полем, создании математической модели процесса ВГСНПМП и конструкции сепаратора ВГСНПМП, в планировании и проведении экспериментов, обработке полученных результатов, формулировании выводов и рекомендаций, защищаемых положений и их доказательстве.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на симпозиуме «Неделя Горняка», Москва, МГГУ, 2013г.; на десятой всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии», Старый Оскол, 2013г.; на симпозиуме «Неделя Горняка» Москва, МГГУ, 2014г.; на симпозиуме «Неделя Горняка», Москва, МИСиС, 2015г.; на Конгрессе обогатителей стран СНГ, Москва, 2015г.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 120 наименований, 38 рисунков и 7 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность доктору технических наук, профессору В.В. Кармазину за научное руководство при выполнении работы.

Работа частично выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» (УИС RFMEFI57814X0049)

Глава 1. Анализ технологических схем, процессов и аппаратов, применяемых для получения высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям бездоменной металлургии

Во второй половине XX века возникшие дефициты источников энергии, территории, распространение производства металла в развивающихся странах, резкий рост требований к качеству металла и возросшие требования экологии заставили пересмотреть критерии успеха при получении черных металлов. На первый план выдвинулось бездоменное производство и, в первую очередь, метод прямого восстановления железа. [8, 30, 40, 62, 108].

Главным требованием, предъявляемым к концентратам, используемым в качестве сырья в бездоменном производстве, является высокое содержание общего железа (более 68%) и низкое содержание кремния (менее 3 %). В России такие концентраты получают магнитными методами только на Лебединском и Оленегорском ГОКах [11, 93]. На других ГОКах качество концентратов регламентируется соответствующими ГОСТ и техническими условиями. Так для месторождений КМА технические условия на магнетитовый концентрат предусматривают: крупность - 0,1-0 мм; влажность - 10,5%; содержание железа - не менее 64%. В ряде концентратов регламентируется содержание вредных примесей - фосфора, серы, кремнезема [16,50].

В рыночных условиях основой для определения цены на концентраты стала их металлургическая ценность и качество концентратов на работающих ГОКах, как правило, выше регламентируемого техническими условиями. Раскрытие минералов в них достаточно высокое, что позволяет, используя различные методы доводки, отделить магнетитовые зерна от их сростков с кварцем и получить суперконцентраты, пригодные для бездоменного передела.

Для решения этой задачи применяются комбинированные способы обогащения.

Важной проблемой технологии обогащения, направленной на получение высококачественных концентратов, является выбор типа измельчения, определяющего раскрытие минералов и всю технологию дальнейшей переработки [85]. Самым простым и надежным решением является шаровое измельчение. Оно гарантирует высокую удельную производительность, но не обеспечивает селективность раскрытия минералов [1].

Низкая селективность раскрытия при шаровом измельчении связана с тем, что благодаря многократному превосходству физико-механических свойств стальных шаров по сравнению с железистыми кварцитами, разрушение последних идет в направлении удара, и зона контакта разделяемых минералов «магнетит-кварц» остается в виде сростков. П. Е. Остапенко считал, что количество необогащаемого класса, т. е. класса который распределяется пополам между концентратом и хвостами определяется произведением площади срастания минералов на средний размер зерна в последней стадии измельчения [65]. Самоизмельчение разрушает сростки по границе срастания минералов, поскольку физико-механические свойства разрушающего и разрушаемого материалов одинаковы.

Самоизмельчение обеспечивает более высокий технологический уровень для повышения качества конечного концентрата. Это подтверждают показатели работы, Лебединского ГОКа, получающего суперконцентраты для бездоменной металлургии ($70\% \text{Fe}_{\text{общ}}$) [101, 48].

Современные комбинированные технологии получения высококачественных концентратов включают магнитную сепарацию с последующей доводкой магнитного концентрата тонким грохочением, гравитационными, флотационными и высокоселективными магнитными методами [9, 26, 52].

1.1 Технологии дообогащения магнетитовых концентратов

В мировой практике доводочные операции (тонкое грохочение, обратная катионная флотация и др.) позволяют повысить массовую долю железа в концентратах до 67,5-71,8% и понизить содержание кремнезёма в них до 3% и менее.

На предприятиях Pea Ridge (США), Malmberget (Швеция) доводочные отделения производят особо чистые концентраты (69-70% железа и до 2,5% кремнезёма), которые используются для электросталеплавильного производства, аккумуляторной промышленности (71-71,2% железа и до 1% кремнезёма) и порошковой металлургии (71,4-71,8% железа и до 0,3% кремнезёма) [1, 30].

Флотация используется для отделения чистых магнетитовых зерен от их сростков с пустыми породами, так как сростки, имея незначительное количество нерудных минералов, обладают почти такой же магнитной восприимчивостью, как и чистые магнитные зерна, и поэтому при магнитной сепарации попадают в концентрат [17, 89].

Флотационная доводка магнетитовых концентратов за рубежом на таких предприятиях как Empire Main. Co. Tilden, (США); Adams, Griffith, Sherman (Канада); Kirkenes (Норвегия); Kiruna (Швеция); Bong Range (Либерия) осуществляется в основном в машинах Wemco, которые отличаются управляемой циркуляцией, способностью работать на грубом продукте и высоким извлечением [113, 117].

Флотация является самым распространённым способом повышения технико-экономических показателей железорудных обогатительных фабрик [26, 79, 89,].

При обогащении руд черных металлов применяются следующие виды флотации [8]:

- флотация рудных минералов анионными собирателями с депрессией минералов пустой породы (прямая анионная флотация);

- флотация с переводом в пенный продукт минералов пустой породы на основе применения активаторов и анионных собирателей для этих минералов и депрессоров для подавления рудных минералов (обратная анионная флотация);
- флотация с переводом в пенный продукт минералов пустой породы на основе применения катионных собирателей и депрессоров рудных минералов (обратная катионная флотация).

Реагентный режим флотации зависит от типа руды.

Обратная анионная флотация наиболее широко применяется для различных разновидностей железных руд, различающихся по вещественному составу. Эта флотация менее чувствительна к наличию шламов, не требует предварительного обесшламливания пульпы и может успешно применяться при повышенной жесткости воды. Обратная анионная флотация более эффективна для бедных концентратов, а обратная катионная флотация эффективнее при флотации продуктов с высоким содержанием железа и незначительным количеством шламов. В частности для получения высококачественных концентратов из концентратов магнитного обогащения. Если магнетитовый концентрат получен из руды с большой массовой долей силикатов (магнетитовые кварциты), то для удаления силикатов применяют обратную катионную флотацию. Преимуществами обратной катионной флотации является то, что она не требует умягчения воды и большого расхода реагентов, ее продолжительность в 2-4 раза меньше, чем анионной, а селективность разделения выше.

Недостатками обратной катионной флотации являются большая чувствительность к наличию шламов и дозировке реагентов, высокая стоимость и повышенная токсичность собирателей.

Обратная катионная флотация нашла применение на обогатительной фабрике Михайловского ГОКа, как метод повышения качества магнетитового концентрата, обеспечивающий производство высококачественных железорудных концентратов, пригодных для

производства доменных окатышей и технологии прямой металлизации [18, 19].

В результате флотационного дообогащения магнетитовых концентратов 5-й стадии мокрой магнитной сепарации, содержащих 66,0% общего железа и 7,3% кремнезема, получают 73,7% (от операции) низкокремнеземистого концентрата с содержанием железа 69,8% и кремнезема 2,9% для технологии прямой металлизации. При этом попутно получают промпродукт, содержащий сrostки, и хвосты с массовыми долями железа 64,0 и 48,0 % соответственно. Технологическая схема включает основную обратную катионную флотацию модифицированными аминами в колонной машине, контрольную флотацию камерного продукта основной флотации и перечистку пенного продукта основной флотации без циркуляции. Извлечение железа в общий концентрат составляет 93,2%.

Возможно получение 12,0% доменного концентрата с содержанием железа 64,0% (от операции выход составляет 62,32%, извлечение- 66,05%) и 7,26% пенного продукта с содержанием железа 69,38% (выход от операции - 37,68%, а извлечение- 33,95%). Получаемые низкокремнеземистые концентраты соответствуют требованиям технологии бездоменной металлургии.

Магнито-флотационная доводка концентратов на Ингулецком ГОКе (Украина) обеспечивает получение флотационного концентрата с содержанием железа 69% при извлечении железа в концентрат до 90% (от операции). Процесс ведется на жесткой технической воде.

Доводка магнетитовых концентратов по технологии ЗАО «НПО «РИВС» осуществляется методом обратной катионной флотации с использованием собирателей на основе аминов. Высокая селективность собирателей исключает необходимость использования депрессоров. Флотация осуществляется на жесткой воде при частичном водообороте. При доводке получен концентрат, содержащий 69,5 % железа (при извлечении от операции 94,62 %) и 1,75 % кремнезема [77].

Практика показывает, что флотационное дообогащение железорудных концентратов, полученных в результате магнитной сепарации, является достаточно эффективным методом, позволяющим осуществлять производство высококачественных железных концентратов. Но сброс химических реагентов ухудшает состояние окружающей среды.

При объективно возрастающей хозяйственной деятельности человечества требования к охране окружающей среды будут только ужесточаться. Выполнение этих охранных мероприятий однозначно будет приводить к увеличению расходной составляющей формулы прибыли при использовании флотационных и физико-химических методов доводки магнетитовых концентратов. Следовательно, прибыльное, по сегодняшним меркам, предприятие через 10-15 лет может оказаться убыточным при чрезвычайно высоких расходах на охрану природы. Поэтому в настоящее время предпочтение отдается экологически чистым технологиям.

В последнее время в отечественной и зарубежной практике переработки железных руд нашло применение гидравлическое вибрационное грохочение [72]. Этот способ осуществляет разделение исходя из крупности и плотности частиц. При этом более мелкие и плотные частицы выводятся в подрешётный продукт. Учитывая особенности разделения на грохоте и особенности формирования фракционного состава магнетитовых промпродуктов и концентратов, тонкое грохочение применяется для стадийного выделения товарных концентратов, а также для получения высококачественного концентрата.

Промышленные испытания по стадийному выделению концентрата при помощи грохотов «Derrick» 2SG48-60W-5STK перед последней стадией измельчения были проведены на ряде фабрик [96, 112] и дали положительные результаты.

На ОФ Высокогорского ГОКа установка двух грохотов с размером отверстия сита 0,18 мм перед второй (последней) стадией измельчения позволила вывести 59 % материала из питания цикла второй стадии в виде

подрешётного продукта. При этом образовался резерв по увеличению производительности секции на 10-20 % при сохранении существующей массовой доли железа в концентрате и большем извлечении железа в концентрат (до 1,0-1,5 %) [65].

На ОФ Качканарского ГОКа на секциях по производству концентрата для агломерации проведены испытания грохотов по стадияльному выделению концентрата. Испытания выполнены на сите с размером отверстия 0,15 мм [64].

Задача повышения качества конечного концентрата при помощи тонкого грохочения решена на ОФ Костомукшского ГОКа в рамках программы модернизации фабрики, предусматривающей повышение массовой доли железа в концентрате, извлечения железа в концентрат и производительности комбината до 33 млн. тонн руды в год [22].

Испытания грохотов «Derrick» 2SG48-60W-5STK с целью повышения качества конечного концентрата проведены на ОФ Соколовско-Сарбайского ГОКа. Испытания проходили на секции № 14 по трёхстадиальной схеме измельчения [104]. В настоящее время на ОФ Соколовско-Сарбайского ГОКа грохоты «Derrick» с размером отверстия просеивающей поверхности 0,1 мм стоят в последних стадиях измельчения секций первой (двухстадиальная схема измельчения) и второй (трёхстадиальная схема измельчения) очередей. На секциях с трёхстадиальной схемой измельчения грохочение песков дешламации третьей стадии измельчения с последующим магнитным обогащением подрешётного продукта позволяет получать магнетитовый концентрат с массовой долей железа 66,6 %.

На ОФ Ковдорского ГОКа грохота «Derrick» разделяют концентрат третьей стадии магнитного обогащения с массовыми долями железа и пятиокси фосфора 63,3 и 0,29 % соответственно на подрешётный продукт с массовыми долями железа и пятиокси фосфора 64,1 и 0,17 % и на надрешётный продукт с массовыми долями железа и пятиокси фосфора 61,5 и 0,58 %. Подрешётный продукт обогащается в последней стадии магнитной

сепарации с получением концентрата № 1 с массовыми долями железа и пятиоксида фосфора 64,2 и 0,14 % соответственно. Надрешётный продукт дополнительно классифицируется, измельчается и обогащается. В результате получается концентрат № 2 с массовыми долями железа и пятиоксида фосфора 63,5 и 0,14 %. Содержание железа в суммарном магнетитовом концентрате составило 64 %. Использование тонкого грохочения позволило повысить содержание железа в концентрате на 0,7 %.

Применение тонкого грохочения на Костомукшском ГОКе позволило повысить массовую долю железа с 65,7 до 67,6% с одновременным повышением извлечения металла с 76,4 до 78%.

Высокие технологические показатели по доводке магнетитового концентрата получены с применением магнито-гравитационного классификатора типа МГК-1500 [28], промышленные испытания проведены на Костомукшском и Лебединском ГОКах. При использовании МГК-1500 на Костомукшском ГОКе можно повысить массовую долю железа в концентрате до 68,5-69,0% без использования тонкого грохочения. На Лебединском ГОКе указанный аппарат позволил получить концентрат с массовой долей железа 70-71% без использования обратной флотации и без выделения отвальных хвостов, т.е. с получением двух концентратов.

На Оленегорском ГОКе для доводки концентрата успешно применяются «бочки Зеленова», являющиеся магнито-гравитационными сепараторами [5]. Там возможно так же применение флотационной доводки концентрата для снижения содержания кремнезема до уровня менее 2% и серы до уровня ниже 0,06% за счет механохимической активации его озоном (разработка НТЦ ГОМУ МГГУ). При этом комбинат может перейти на технологию горячего брикетирования по опыту Лебединского ГОКа, повысив стоимость своей продукции на порядок [59].

В случаях, когда для повышения степени раскрытия рудных минералов при дообогащении магнетитовых концентратов необходимо измельчение рядового концентрата в шаровой мельнице, необходимо учитывать, что без

предварительной подготовки магнетитовой пульпы, этот процесс приводит к переизмельчению, ошламованию и потерям полезного компонента при последующей магнитной дешламации и магнитной сепарации [73]. Для предотвращения этих явлений возможно использовать способ получения высококачественного магнетитового концентрата [70], предусматривающий уплотнение пульпы до массовой доли твердого 70%, дезактивацию для отделения шламистых частиц нерудных минералов с поверхности рудных, а так же магнитно – гравитационное концентрирование подготовленного продукта в восходящем потоке и электромагнитном поле с напряженностью не более 24 кА/м.

Такая предварительная подготовка рядового магнетитового концентрата позволяет избежать в дальнейшем налипания за счет сил адгезии минералов пустой породы на крупные зерна рудных минералов и предотвратить их попадание в концентрат. Благодаря тому, что магнитно-гравитационная концентрация осуществляется по трем физическим признакам: крупности, плотности и магнитным свойствам минеральных комплексов, происходит селективное разделение рудной и нерудной фаз. Уплотнение и дезактивация магнетитовой пульпы и последующее магнитно-гравитационное концентрирование позволяют удалить часть свободного нерудного материала со сливом концентратора в отвальные хвосты. Черновой концентрат классифицируют на два продукта - крупный и тонкий. Крупный продукт доизмельчают, затем объединяют с тонким, что позволяет предотвратить переизмельчение свободных рудных частиц, раскрыть сростки без ошламования рудной фазы, и выделить нерудные частицы в отвальные хвосты.

Одним из наиболее эффективных методов борьбы с отрицательным влиянием флокуляции на процесс мокрой магнитной сепарации тонкоизмельченных материалов является применение вращающихся магнитных полей [56, 57]. Начиная с 60-х годов прошлого столетия, в этом направлении ведется много исследований. За последний период было

предложено большое количество различных конструкций магнитных сепараторов с бегущими магнитными полями. Известны конструкции сепараторов с вращающейся и неподвижной магнитной системой [39, 67, 69].

Магнитная сепарация во вращающемся поле позволяет не только повышать качество железных концентратов, но и получать концентраты стадийно [71].

Промышленные испытания на Михайловском и Лебединском ГОКах показали высокую эффективность разработанного в НТЦ МГГУ высокоселективного магнитного сепаратора с вращающейся магнитной системой ВСПБМ-90/100.

Предложен вариант схемы обогащения, в которой питанием сепаратора ВСПБМ – 90/100 служат пески дещламации V стадии мокрой магнитной сепарации. По этой схеме можно получать два продукта: концентрат с содержанием железа общего 70,2% после флотации, который будет отправляться на ГБЖ и рядовой концентрат с содержанием железа общего 65,1% для получения окатышей. Реализация предложенного способа позволит по сравнению с действующей схемой обогащения на ОММО ДОК МГОКа, не снижая производительности, получать как высококачественные концентраты для ГБЖ, так и рядовой концентрат для фабрики окомкования [27].

1.2 Анализ конструкций магнитных сепараторов, применяемых для получения высококачественных концентратов

На железорудных ГОКах Российской Федерации мокрая магнитная сепарация осуществляется на сепараторах типа ПБМ (постоянные магниты, барабанный, мокрый). В этих сепараторах пульпа через приёмное устройство поступает в рабочее пространство под барабан сепаратора. Магнитные частицы, извлекаемые из нее силой притяжения магнитной системы, набранной из постоянных керамических магнитов, притягиваются к

поверхности барабана, выносятся вращением барабана из зоны сепарации и смываются водой в приёмник магнитного концентрата [29, 54].

Промышленные модели сепараторов ПБМ отличаются своими размерами, типами ванн и имеют большую производительность. Например, противоточный сепаратор ПБМ-П-120/300 обеспечивает производительность 200-300 т/ч при крупности питания $-4+0$ мм. Напряженность поля на поверхности барабана достигает 100 кА/м. Сепараторы ПБМ имеют магнитные системы с чередующимися полюсами магнитов, а также прямо-, противо- и полупротивоточные ванны. Конструкция сепараторов ПБМ показана на рисунке 1.1.

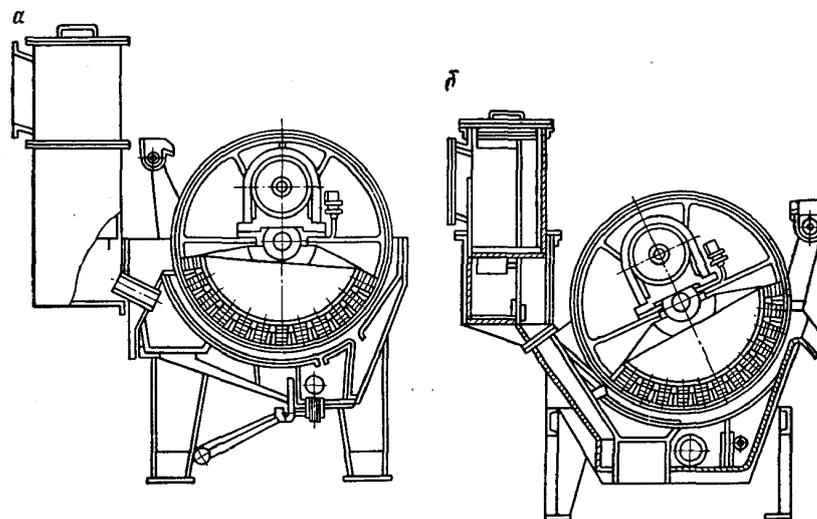


Рисунок 1.1 - Разрезы противо- и полупротивоточных сепараторов ПБМ-П-120/300 (а) и ПБМ-ПП-120/300 (б)

Барабанные сепараторы выпускаются и зарубежными производителями: «Sala», «Jafri», «Rapid», «Indiana» и др. и имеют похожую конструкцию. Сепараторы этого типа обеспечивают хорошее извлечение магнитного продукта (до 98%), что обусловлено высокой напряженностью поля на поверхности барабана (до 120 кА/м) [25,118]. Однако вследствие недостаточной селективности на большинстве ГОКов не удаётся достичь содержания железа общего железа в концентратах выше 65,5% без применения дополнительной их доводки, например, флотации [64, 84].

Наилучший из современных серийных магнитных сепараторов (ПБМ 120/300) способен выделять в отвальный продукт (хвосты) только немагнитные зёрна пустой породы и очень бедные сростки, а в концентрат - всю рудную смесь (магнетит и его сростки) [29]. Выделять чистый магнетит на нем невозможно по трем причинам:

- контрастность магнитных свойств на границе разделения между магнитной рудной смесью и немагнитными породными минералами значительно выше, чем между элементами рудной смеси (магнетитом и сростками), а селективность сепараторов недостаточна;

- жесткая магнитная флокуляция частиц магнетита в относительно сильном поле рабочей зоны сепаратора вызывает захват бедных сростков и частиц пустой породы в концентрат;

- высокая физико-механическая активация материала и пьезоэффект после измельчения вызывает появление зарядов у частиц кварца, которые закрепляют их на поверхностях магнетита кулоновскими силами «зеркального отображения».

Физической основой перечисленных проблем является существование двух разновидностей магнитной силы: адгезионной или потокосцепления (ближнего действия) и пондеромоторной – градиентной (дальнего действия). Первая вызывает флокуляцию частиц, а вторая - их сепарацию.

Первая неселективна, существует даже в слабых полях за счет остаточной намагниченности, но только при контакте между магнитными частицами, а вторая селективна и действует на достаточно большом расстоянии, но требует более высоких значений напряженности магнитного поля.

В серийных сепараторах типа ПБМ величина силы потокосцепления частиц достаточна для создания прочных флокул, и градиентная сила притягивает к барабану уже готовые флокулы, отделяя их от кварцевых зерен.

Магнитная флокуляция материала, вызванная наведенной или остаточной его намагниченностью и силами потокосцепления сохраняет флокулы даже вне магнитного поля и препятствует отделению магнитных частиц от их сростков с немагнитными при ММС сильномагнитных материалов [29].

Для повышения селективности ММС Т.Е. Владимировым [20] была предложена конструкция электромагнитного сепаратора с вертикально расположенной плоской магнитной системой, создающей бегущее магнитное поле, и вынесенным из зоны сепарации индукционным барабаном (рисунок 1.2.б). Сепаратор позволил получить высококачественные концентраты – вплоть до чистого магнетита, но он не получил промышленного применения из-за сложной электромагнитной системы и низкой производительности.

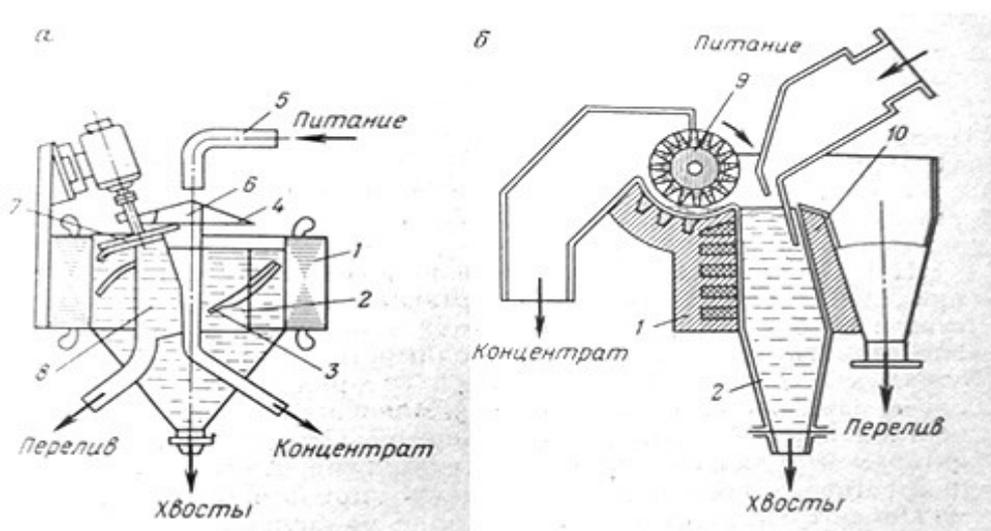


Рисунок 1.2. Электромагнитные сепараторы конструкции Т.Е. Владимирова с бегущим полем статорного типа (а) и плоскостного типа (б).

- 1 – магнитная система; 2 – ванна; 3 – направляющая спирали;
 4 – распределительный конус; 5 – питающая труба; 6 – приемник концентратов; 7 – индукционный диск; 8 – приемник перелива;
 9 – индукционный барабан; 10 – магнитный экран.

На Абагурской фабрике, а затем в Кривбассе были изготовлены и испытывались барабанные сепараторы типоразмера 167А-СЭ с бегущим магнитным полем и электромагнитными и комбинированными магнитными системами [29]. Принцип работы сепаратора 167А-СЭ заключается в следующем: питание по двум трубам направляется в загрузочную коробку сепаратора, откуда равномерным слоем подается на питающий лоток ванны под вращающийся барабан. Магнитные частицы под воздействием магнитного поля притягиваются к барабану и перемещаются к краю магнитной системы, где они отделяются от барабана и самотеком поступают в разгрузочную коробку. Немагнитные частицы вместе с основной массой воды разгружаются через хвостовые насадки и хвостовой патрубок. Производительность сепаратора достигает 35 т/ч при содержании твердого в питании 50%.

Определенными преимуществами перед электромагнитными сепараторами обладают сепараторы с вращающимися постоянными магнитами.

Известен магнитный сепаратор [29], разработанный в Уралмеханобре, рабочая ванна которого выполнена в виде системы наклонных каналов, расположенных по периметру вертикальной вращающейся магнитной системы (рисунок 1.3). В этой конструкции активно противодействуют друг другу управляемые магнитные и центробежные силы. Исходный материал равномерно распределяется по каналам. Опускаясь вниз, пульпа попадает в зону действия вращающегося магнитного поля, создаваемого вращающейся системой постоянных магнитов.

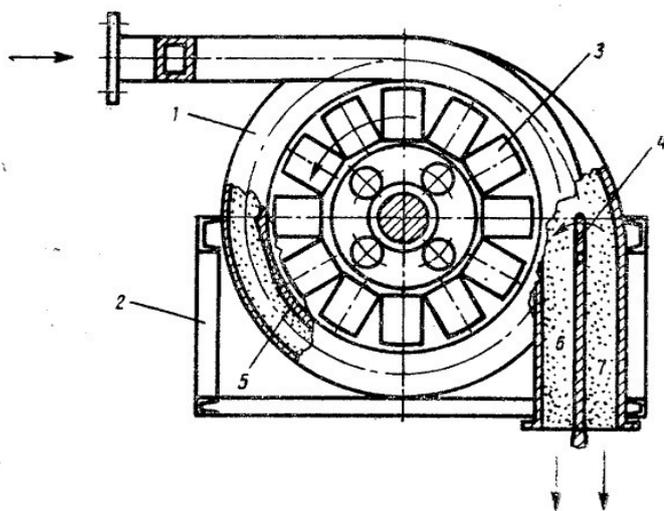


Рисунок 1.3 Барабанный сепаратор с вращающейся магнитной системой конструкции института Уралмеханобр.

1 – корпус сепаратора; 2 – рама; 3 – вращающаяся магнитная система; 4 – делитель выходных продуктов; 5 – каналы; 6 – магнитный продукт; 7 – немагнитный продукт.

Под действием магнитных сил магнитные частицы выделяются из потока и притягиваются к стенке рабочего канала. Так как магнитный барабан вращается, и рабочие каналы наклонены в сторону вращения, то перемещение магнитных флюкул осуществляется только под действием магнитного поля. Под действием центробежных и магнитных сил пульпа расслаивается: немагнитные частицы отбрасываются к периферийной стенке желоба, магнитные притягиваются к внутренней стенке. Затем частицы продвигаются к разгрузочному концу желоба, где поток рассекается делительной перегородкой на магнитный и немагнитный продукты.

Разработанная в Уралмеханобре укрупненная непрерывно действующая установка с рабочим желобом центробежного сепаратора диаметром 600мм и производительностью до 3т/ч состояла из следующих узлов (рисунок 1.4): расходного бачка-агитатора, пульпопровода, насоса, рабочего желоба, выполненного в виде спирали, надеваемой на барабан с подвижной магнитной системой, привода магнитной системы и станины.

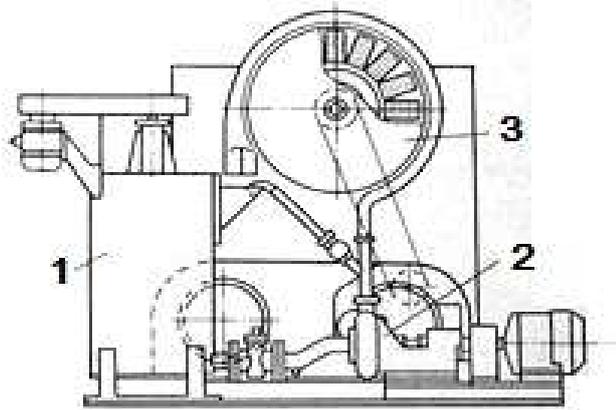


Рисунок 1.4 - Установка для центробежной мокрой сепарации конструкции Уралмеханобра.

1 – бак-смеситель; 2 – насос; 3 – центробежный сепаратор.

Исследования показали, что данный сепаратор целесообразно применять при доводке конечных магнитных продуктов.

Сепаратор конструкции ВНИИцветмета (рисунок 1.5) [44] внешне напоминает обычный барабанный сепаратор и состоит из футерованного резиной ротора набранного из штампованных листов стали с пазами, в которые заложена трехфазная обмотка. Движение потока пульпы в ванне совпадает с направлением вращения ротора и магнитного поля. При переменном токе 50А и напряжении 35В напряженность поля на поверхности ротора составляет 120 кА/м, а на расстоянии 10мм от поверхности 95 кА/м.

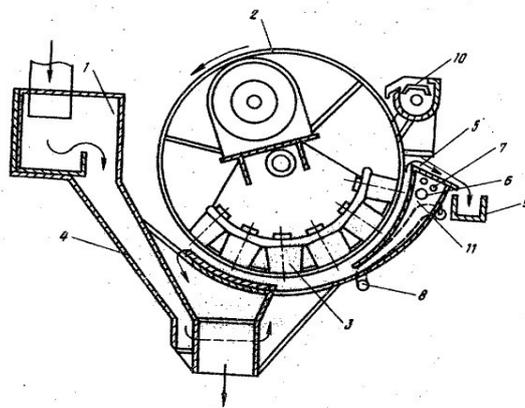


Рисунок 1.5 - Магнитный сепаратор с качающейся магнитной системой конструкции ВНИИцветмета.

1 – приёмник; 2 – барабан, 3 – качающаяся магнитная система, желоб подачи питания; 5 – концентрат; 6 – съёмник; 7,8,10 – брызгала; 9 – приёмник концентрата.

Двухроторный электромагнитный сепаратор аналогичной конструкции (рисунок 1.6) также разработан ВНИИцветмет.

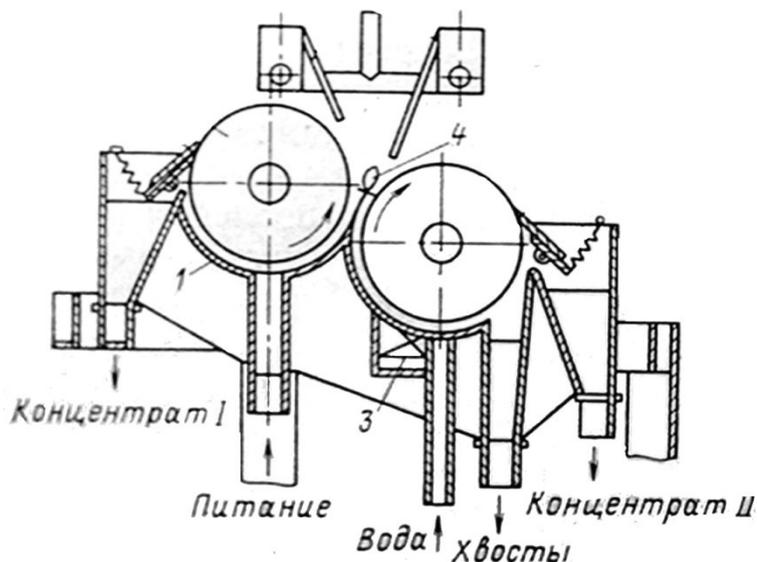


Рисунок 1.6 – Схема двухроторного электромагнитного сепаратора конструкции ВНИИцветмет.

1 – ванна сепаратора; 2- барабаны сепаратора; 3 – устройство разгрузки песковой фракции; 4 – переливной клапан.

Под действием центробежной силы, обусловленной бегущим магнитным полем, магнитные флоккулы разрушаются. Взвешенный в магнитном поле у стенок статора слой ферромагнитных частиц выжимает к центру ванны пустую породу, которая уносится потоком воды вниз и разгружается через насадку. Чистые магнитные частицы под действием магнитных сил перемещаются в радиальном направлении к поверхности ванны, достигнув которой двигаются по окружности в сторону, противоположную перемещению бегущего поля. Частицы разгружаются индукционным диском в приемник концентрата. Сепаратор показал высокую эффективность сепарации, но недостатком является его малая производительность.

В институте Уралмеханобр была разработана и изготовлена экспериментальная модель сепаратора с бегущим магнитным полем (рисунок 1.7), предназначенного для работы в операциях доводки магнетитовых концентратов [44]. Особенностью сепаратора является наличие вращающейся внутри немагнитного кожуха барабана круговой многополюсной магнитной системы с полюсами чередующейся полярности.

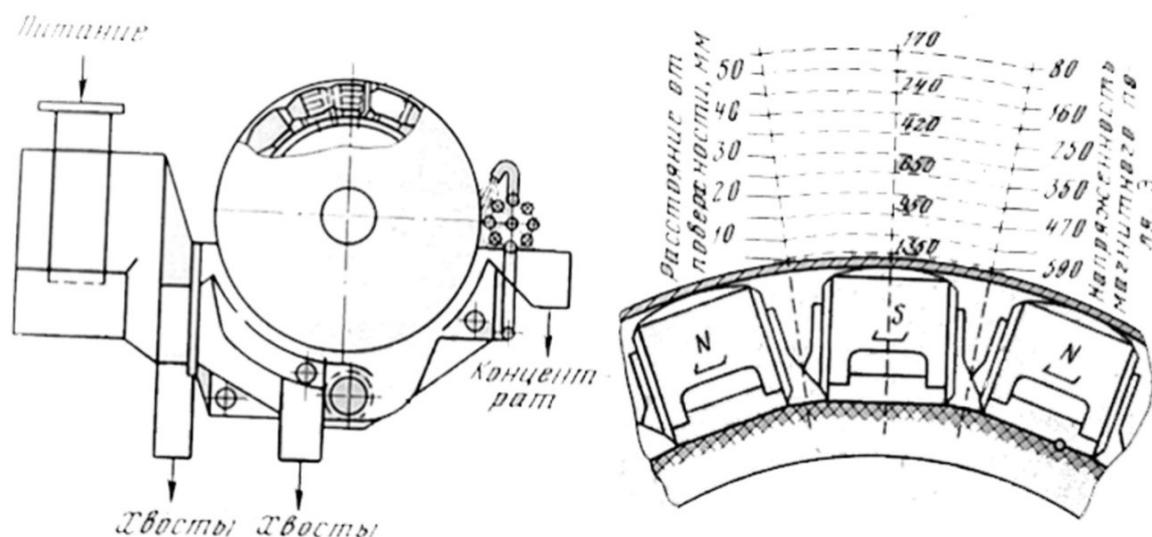


Рисунок 1.7 –Магнитный сепаратор с вращающейся магнитной системой конструкции Уралмеханобр.

Благодаря этому в каждой точке над поверхностью барабана вектор напряженности магнитного поля совершает вращательное движение. Образующееся при этом магнитное поле способствует многократной переориентации магнитных флокул и частичному их разрушению. Это приводит к интенсивному освобождению из флокул механически захваченных породных частиц и дообогащению магнитного продукта. Сепаратор имеет ванну полупротивоточного типа. В отличие от аналогичных конструкций в сепараторе предусмотрено глубокое погружение барабана в пульпу (на $2/3$ его радиуса), что способствует увеличению длины рабочей зоны и повышению извлечения полезного компонента в магнитный продукт. Исследования показали, что при использовании полупротивоточной ванны наиболее рациональным является направление вращения магнитной системы,

совпадающее с направлением вращения барабана сепаратора. Это позволяет снизить потери магнетита с хвостами. Исследования также показали, что сепаратор устойчив к колебаниям нагрузки в широких пределах.

Магнитный сепаратор с вращающимся полем роторного типа конструкции Уралмеханобра показан на рисунке 1.8. Пульпа под давлением подается в криволинейный желоб, где под действием магнитных и центробежных сил разделяется на магнитную и немагнитную фракции. Через перфорационные отверстия в желоб подается вода для промывки магнитной фракции. Немагнитная фракция отесняется под действием центробежных сил к внешней стенке желоба и через перфорационные отверстия вытесняется из аппарата. Напряженность магнитного поля на внутренней поверхности рабочего желоба составляет 6,3 кА/м.

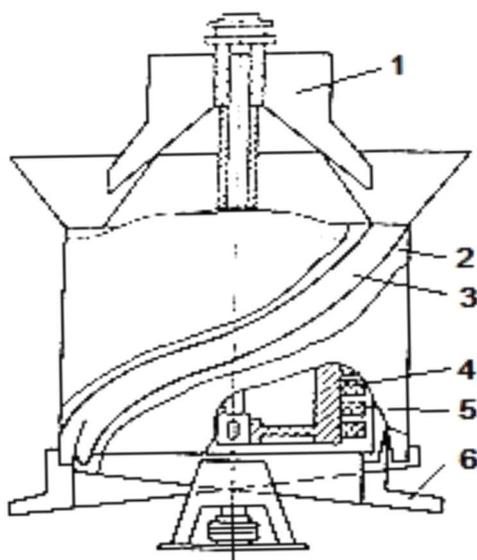


Рисунок 1.8 -Магнитный сепаратор с вращающимся полем роторного типа конструкции Уралмеханобра.

1 – питатель; 2 – рабочая ванна; 3 – наклонные каналы; 4 – барабан; 5 – постоянные магниты; 6 – разгрузочное устройство.

Известны так же конструкции сепараторов карусельного типа, использующих полиградиентную среду для извлечения магнитной фракции.

Примером такого сепаратора может быть электромагнитный сепаратор, разработанный в НИИЧермет (рисунок 1.9) [6].

Электромагнитный сепаратор состоит из электромагнитной системы с магнитопроводом 1, внутри которого расположены катушки 2 и ротор 3 с кольцевой рабочей зоной, заполненной ферромагнитными телами 4, установленный с возможностью вращения внутри магнитопровода 1. Кроме того, сепаратор снабжен перфорированной пластиной 9. Исходное питание попадает через каналы 5. Проходя через футерованную часть каналов 8 с большой скоростью, пульпа попадает в расширенную часть 7, где замедляется и, проходя через футерованную пластину 9, поступает в рабочую зону, заполненную ферромагнитными телами. Магнитная фракция удерживается в рабочей зоне, а немагнитная свободно выносится через отверстия 6. Далее магнитная фракция выносится ротором из зоны действия магнитной системы вместе с ферромагнитными телами и разгружается промывкой в отсутствие магнитного поля.

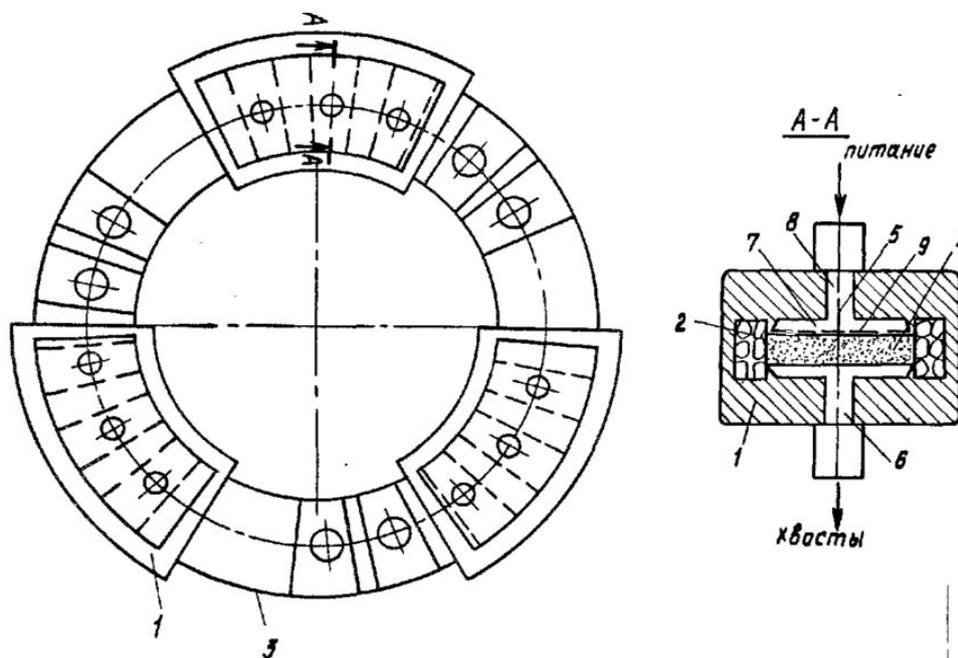


Рисунок - 1.9. Электромагнитный сепаратор конструкции НИИЧермет.

1 – кожух; 2 – уплотнитель; 3 – ротор; 4 – ферромагнитные тела; 5 – канал подачи питания; 6 – выходной канал; 7 – рабочая камера; 8 – футерованная часть канала; 9 – футерованная пластина.

Конструкции сепараторов роторного типа, несмотря на высокую эффективность, не нашли широкого применения в обогащении магнетитовых концентратов из-за большой энерго- и металлоемкости и невысокой производительности.

В процессе мокрой сепарации вязкость воды не позволяет флокулам быстро вращаться для разрушения центробежными силами, и поэтому понадобились дополнительные исследования по созданию соответствующих конструкций сепараторов.

Изучались следующие возможные подходы к решению этой задачи:

- управление ростом флокул в условиях перемешивания, когда в их ядро попадают только чистые магнетитовые зерна и такие флокулы переходят затем в концентрат;
- постоянное разрушение флокул в процессах сепарации;
- разрушение флокул между процессами сепарации;
- ослабление флокулообразования за счет снижения напряженности внешнего намагничивающего поля в сепараторе;
- очистка магнетитовых флокул от зерен пустой породы механическими воздействиями на их структуру.

Второй подход был реализован в сепараторах с амплитудно-частотной модуляцией магнитного поля, создаваемой магнитной системой на постоянных магнитах [92]. Сепаратор показал неплохие результаты, но массового применения не нашел.

Первый и четвертый подходы давно реализованы в известном магнито-гравитационном сепараторе – магнитный турбоциклон «бочка Зеленова» (рисунок 1.10) [5]. Слабое магнитное поле поддерживает во взвешенном состоянии ленточные структуры флокул, при этом они совершают круговое вращательное движение, высвобождаясь при этом от немагнитной фракции.

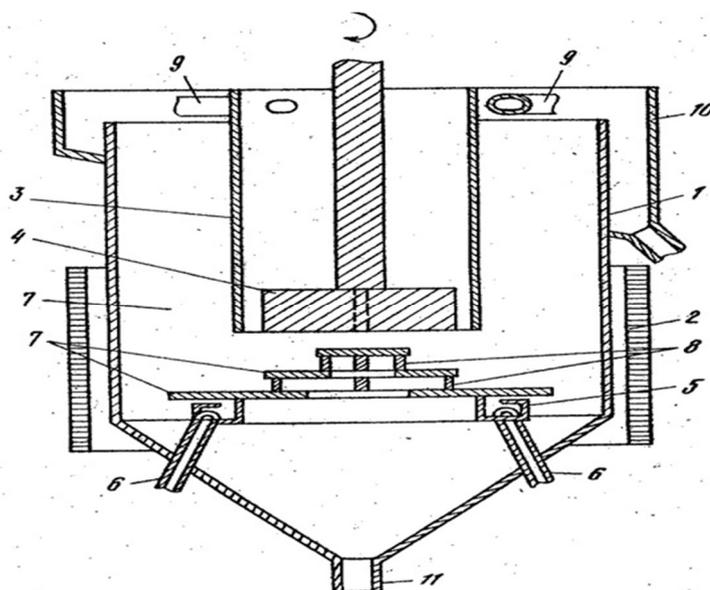


Рисунок 1.10 - Электромагнитный сепаратор Зеленова.

1 – корпус; 2 – электромагнитная система; 3 - загрузочное устройство; 4- лопастная мешалка; 5 – устройство подачи воды; 6- тангенциальные патрубки; 7- диски; 8 - крепление дисков; 9 - устройство для подачи питания; 10, 11 – разгрузочные устройства.

С гидромеханической точки зрения такой сепаратор является магнитным турбоциклоном, в котором вращение пульпы вызывается импеллером или тангенциальной подачей питания.

В результате этой операции удалось повысить содержание железа в концентрате на 6,5%(до 68%) при его извлечении 95%. Разработан размерный ряд этих сепараторов с различной производительностью и даже системами автоматизации.

Эти сепараторы успешно отработали на Оленегорском ГОКе уже около тридцати лет, обеспечивая производство суперконцентратов для бездоменной металлургии. Кроме того, они были успешно испытаны на ряде других ГОКов, в частности на Лебединском ГОКе [106].

На рисунке 1.11 показан магнитный сепаратор, разработанный к.т.н. В.А. Измалковым и проф. В.В. Кармазиным, для осуществления выше

описанного способа магнитного обогащения руд [80]. Сепаратор запатентован совместно МГГУ и ОАО «Лебединский ГОК».

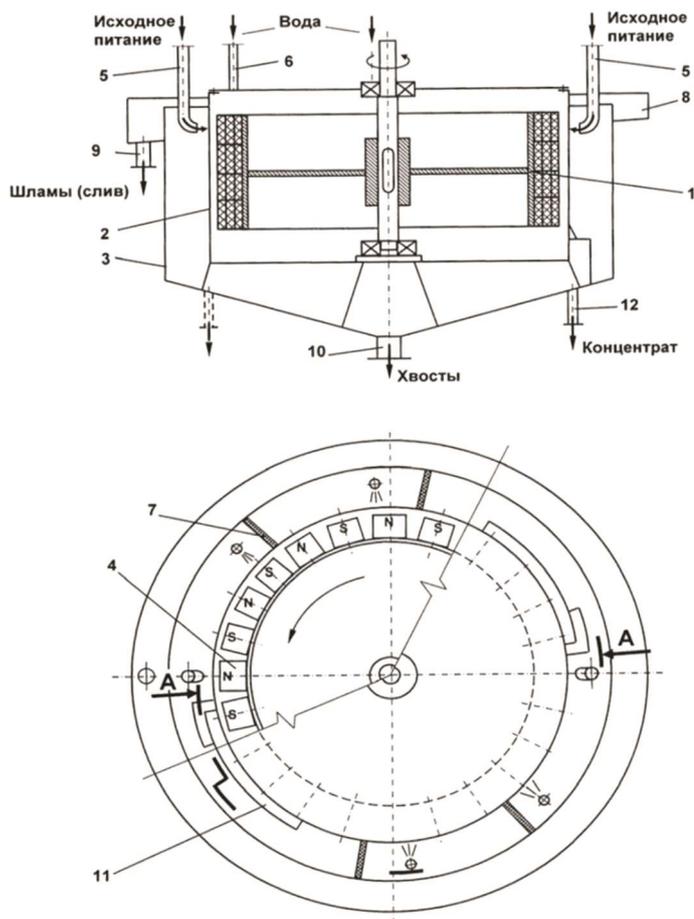


Рисунок 1.11 - Магнитный сепаратор МГГУ и ОАО «Лебединский ГОК» (авторы Измалков В.А. и Кармазин В.В.)

1 - ротор магнитного сепаратора; 2 - кожух-обечайка; 3 - корпус сепаратора; 4 - магнитная система; 5 - патрубок подачи питания; 6 - патрубок подачи воды; 7 - сетка; 8 - кольцевой желоб; 9 - слив шлама; 10 - слив хвостов; 11 - спиральная направляющая; 12 - слив концентрата.

Магнитный сепаратор работает следующим образом: исходное питание в виде пульпы через патрубки 5 подается на рабочую внешнюю поверхность, вертикально установленного кожуха-обечайки 2, внутри которого расположена круговая вращающаяся магнитная система 1. Кожух с магнитной системой располагается в корпусе 3. Вращающаяся магнитная система на основе постоянных магнитов 4 с чередующейся полярности (N-S-

N-S...) создает бегущее магнитное поле, характеризующееся вращением вектора напряженности в каждой точке рабочей поверхности кожуха и вызывающее вращение и качение флокул по поверхности кожуха. Немагнитные частицы под действием гравитационных сил опускаются на дно корпуса и разгружаются через патрубок 10, а слой флокул, образовавшийся в магнитном поле из частиц магнитной фракции и притянувшийся к поверхности кожуха, начинает двигаться навстречу движению полюсов магнитной системы. Флокулы под действием пондеромоторной магнитной силы, проходя через сетки 7, разрушаются (деструктурируются), а струи воды из коллекторов 6 вымывают при этом пустопородные и сростковые частицы, которые также опускаются вниз и разгружаются через патрубок 10. Шламистые частицы за счет восходящего потока воды поднимаются вверх, поступают в кольцевой желоб 8 и разгружаются через патрубок 9. Пройдя сквозь сетку, чистые магнитные частицы вновь формируются в слой флокул, который спиральной направляющей 11 выводится из зоны действия магнитного поля вниз и разгружается через концентратный патрубок 12.

Поступая через патрубок подачи питания 5 в зону действия магнитного поля, частицы магнетита образуют флокулы и начинают двигаться, перекачиваясь по стенке корпуса навстречу вращению магнитной системы. При движении слоя флокул под действием гидромеханических сил струй промывной воды патрубки 9 освобождаются от немагнитных и сростковых фракций, которые опускаются в нижнюю часть камеры и разгружаются через патрубок 11. При прохождении флокул через сетки 6 происходит механическая дефлокуляция, затем повторная флокуляция, что позволяет повысить эффективность процесса разделения частиц по магнитным свойствам. С помощью спиральной направляющей 8 флокулы выводятся из зоны действия магнитного поля и поступают в концентратный отсек (сборник 7). Шламистая часть сепарируемого материала разгружается в желоб 3. При этом нарушаются условия потокосцепления, обуславливающие

высокую прочность флокул, они «рассыпаются», а пондеромоторная магнитная сила, превосходя силы потокосцепления, способна протянуть сквозь сетку только магнетитовые зерна и богатые сростки. Рассеянные зерна пустой породы и бедные сростки тут же оседают в приемники для хвостов или промпродуктов. Однако данный аппарат обладает низкой производительностью и предъявляет высокие требования к крупности исходного питания, так как размеры ячеек сетки сопоставимы с размерами минеральных зерен.

Для реализации этого подхода было необходимо создание условий механического разрушения флокул (нейтрализации силы потокосцепления). Для этого было использовано «продавливание» их сквозь немагнитную сетку потоком пульпы. В качестве первой такой конструкции был изучен прямоточный магнитный шлюз, разделенный по горизонтали латунной сеткой с ячейкой 100 мкм, который способен достигать высокой удельной производительности. На искусственной смеси («магнетит-кварц» 4:1) результаты разделения оказались удовлетворительными, однако на реальных продуктах магнитный продукт оказывался засоренным сростками.

Это исследование показывает, что для повышения эффективности процесса магнитной сепарации необходимо управление флокулообразованием в рабочем пространстве сепаратора.

Такой механизм сепарации успешно реализован в высокоселективном опытно-промышленном сепараторе НТЦ МГГУ – ВСПБМ-90/100 (рисунок 1.12) с вращающейся магнитной системой [66], который прошёл промышленные испытания на ОФ Михайловского и Лебединского ГОКов.

Он является аналогом конструкции сепаратора Лаурилла [116] в мокром варианте, хотя имеет множество специфических особенностей, связанных с условиями работы. Мокрый магнитный сепаратор ВСПБМ-90/100 состоит из барабана, установленного в корпусе с возможностью вращения, круговой магнитной системы с постоянными магнитами чередующейся полярности, установленной внутри барабана, индукционной

щетки с брызгалами для съема концентрата с поверхности барабана, загрузочного и разгрузочных устройств. Магнитная система, как и барабан, имеет частотный регулятор числа оборотов и вращается навстречу вращению барабана.

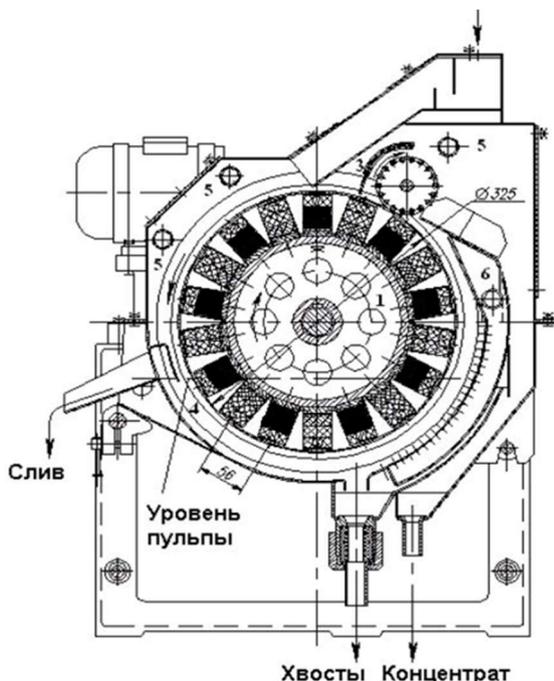


Рисунок 1.12 – Схема экспериментального высокоселективного магнитного сепаратора ВСПБМ-90/100

1 – магнитная система; 2 – лоток для съема концентрата; 3 – индукционный съемник концентрата типа «белые колесо»; 4 – барабан с ребрами; 5 – брызгало; 6 – брызгало для перечистки концентрата; 7 – ванна сепаратора

Испытания сепаратора ВСПБМ-90/100 проводились в условиях ЛГОКа и МГОКа. При испытаниях сепаратора ВСПБМ – 90/100 на Лебединском ГОКе прирост общего железа в концентрат был довольно значителен и составил в среднем 7,5%, что значительно превышает прирост содержания общего железа в концентрате при аналогичных месте и условиях работы сепараторов ПБМ – 90/250 и ПБМ – 120/300 [3].

В условиях МГОКа сепаратор ВСПБМ-90/100 работал на питании второй стадии мокрой магнитной сепарации (прирост качества концентрата

составлял до 12,1%) и на концентрате V стадии мокрой магнитной сепарации (прирост железа общего в концентрате изменялся от 1,3 % до 2,4 %).

По результатам промышленных испытаний [37] запатентована схема стадийного выделения концентрата [36] с массовой долей железа 68,5 %.

Проведенные испытания позволяют говорить о хороших перспективах использования сепаратора ВСПБМ–90/100, а также рассматривать магнитные сепараторы с вращающимся магнитным полем, препятствующим флокуляции магнитных частиц, как наиболее эффективные для дообогащения магнетитовых концентратов [4, 39].

Самым новым вариантом повышения качества магнетитовых концентратов является высокоградиентная магнитная сепарации в слабом поле. Этот способ успешно испытан проф. А.М. Туркеничем и его аспирантами на обычных высокоградиентных магнитных сепараторах [12, 13, 86, 91]. Туркеничем был получен патент на способ мокрой высокоградиентной сепарации тонкодисперсных магнетитовых руд и устройство для его осуществления [68].

1.3 Выводы

Рассмотренный опыт доводки концентратов на современных фабриках обогащения магнетитовых кварцитов показывает, что в настоящее время получение концентратов для бездоменной металлургии магнитными методами наиболее экономично и экологически безопасно, но существующие технологии магнитного дообогащения не на всех ГОКах РФ достаточно эффективны и требуют дальнейшего совершенствования.

Изучение достоинств и недостатков известных конструкций мокрых магнитных сепараторов с частотными и бегущими магнитными полями позволяет сформулировать следующие выводы:

- повышение качества концентрата можно достичь только при применении переменного или вращающегося магнитного поля;

- при получении высококачественных концентратов флокуляция является процессом, препятствующим селективному разделению, и образование её нужно по возможности контролировать;

-для увеличения удельной производительности сепаратора магнитная система должна обеспечивать достаточную глубину и длину распространения градиентного магнитного поля, а разгрузочные устройства обеспечивать быстрый вывод из процесса продуктов разделения,

-для повышения эффективности разрушения флокул и селективности извлечения частиц необходимо обеспечить достаточно высокую (выше 20Гц) частоту магнитного поля и создать такие условия, при которых основным критерием разделения была бы магнитная восприимчивость частиц.

При получении высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям бездоменной металлургии, экологическая безопасность, высокая производительность и низкая стоимость магнитной сепарации ставит ее вне конкуренции в сравнении с другими методами.

Мокрую магнитную сепарацию следует рассматривать в качестве главного способа дообогащения магнетитовых кварцитов. Поэтому разработка новых методов магнитной сепарации для осуществления интенсивных технологий получения суперконцентратов является перспективным научным направлением.

При получении высококачественных концентратов флокуляция является процессом, препятствующим селективному разделению, и образование её нужно по возможности контролировать.

Для получения высококачественных концентратов наиболее эффективными зарекомендовали себя магнитные сепараторы с вращающимся магнитным полем, препятствующим флокуляции магнитных частиц.

Наши экспериментальные и теоретические исследования подтвердили и даже улучшили эти результаты за счет предложенного нового процесса высокоградиентной сепарации в слабом переменном магнитном поле (ВГСНПП). В этих исследованиях, которым посвящена настоящая

диссертационная работа, удавалось повысить качество магнетитовых концентратов на 3-4%.

Глава 2. Повышение селективности магнитного обогащения железорудных концентратов на основе управления процессом магнитной флокуляции

Как известно, для ферромагнитных суспензий, помещенных в магнитное поле, характерно взаимодействие частиц с образованием флокул [29].

Кроме этого, в некоторых источниках есть указания на диэлектрическую поляризацию частиц кварца за счет их пьезозарядки в процессах измельчения, в результате чего они так же притягиваются к поверхности проводника – магнетита, разубоживая концентрат [52].

Анализ технологического опыта получения высококачественных железорудных концентратов, приведенный в первой главе настоящей работы, показал, что магнитная флокуляция оказывает существенное влияние на процесс магнитной сепарации, способствуя, с одной стороны более полному извлечению тонких магнетитовых зерен, с другой - вызывая засорение концентрата путем захвата во флокулы немагнитных частиц [2, 95].

Поэтому при получении высококачественных концентратов проблема управления процессом флокулообразования выходит на первый план.

Для целенаправленного воздействия на этот процесс необходим теоретический анализ взаимодействия факторов, обуславливающих возникновение флокул.

2.1. Анализ процесса флокуляции при обогащении во вращающихся магнитных полях.

Практически все известные на сегодняшний день высокоселективные сепараторы построены на основе применения вращающихся магнитных

полей. Процесс магнитной сепарации во вращающихся магнитных полях создает условия для вращения флокул в рабочем пространстве сепаратора, что затрудняет захват бедных сростков в формирующиеся флокулы [28, 29, 90, 92, 107, 112].

Уравнение движения центра тяжести флокулы при сухой магнитной сепарации можно записать как [28]:

$$x = a \cos \omega t; y = a \sin \omega t \quad (2.1)$$

где: a – длина большой полуоси флокулы, м;

ω – угловая частота ее вращения, сек⁻¹.

При мокрой магнитной сепарации следует учитывать влияние силы динамического сопротивления среды (или силы Стокса), которая имеет большое значение при движении флокул в потоке жидкости. Она определяется по формуле:

$$F_c = \frac{3\Delta V^2}{8d\delta} \quad (2.2)$$

где: V – скорость флокулы, м/с;

d – размер флокулы, м;

δ – плотность флокулы, кг/м³;

Δ – плотность среды, кг/м³.

Эта сила отрицательно влияет на эффективность сепарации. Когда она превышает сумму сил,двигающих флокулу вместе с барабаном, последняя начинает отставать от точки на поверхности барабана, при этом угол отставания продольной оси флокулы от вектора поля α увеличивается. Когда угол составит 180°, флокула, имеющая определенную остаточную намагниченность, выталкивается магнитным полем за зону удерживания и будет унесена центробежной силой в хвосты [28].

Это явление повторяется периодически через каждые 180° и приводит к резкому снижению эффективности сепарации, что доказано практикой обогащения на Лебединском ГОКе.

При вращении магнитной системы с чередующейся полярностью вектор напряженности поля в любой точке над поверхностью барабана совершает вращательное движение навстречу магнитной системе. Частота этого вращения равна частоте магнитного поля, т.е. пропорциональна относительной скорости вращения барабана против магнитной системы и числу пар полюсов[29]:

$$V = \frac{n_1 \pm n_2}{60} \frac{m}{2} = \frac{n_{отн}}{60} \frac{m}{2} = \frac{\omega_{отн} m}{4} \text{ м/с} \quad (2.3)$$

где: n_1 — число оборотов барабана в минуту;

n_2 — число оборотов магнитного шкива в минуту;

m — число полюсов магнитной системы;

$\omega_{отн}$ — относительная частота вращения барабана против магнитного шкива, сек^{-1} .

Угловая частота вращения вектора напряженности магнитного поля при этом составляет [23]:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{\pi n_{отн} m}{60} = \frac{1}{2} \omega_{отн} m, \text{ сек}^{-1} \quad (2.4)$$

Магнитное поле стремится повернуть флоккулу продольной осью по направлению вектора напряженности поля. Это означает, что на флоккулу в магнитном поле действует пара сил, пропорциональная синусу угла α и удлинённости флоккулы $\lambda = \frac{a}{b}$. При небольших значениях α , когда $\sin \alpha \rightarrow \alpha$,

эту пару можно записать следующим образом [28]:

$$P = V \cdot H^2 (\chi_a - \chi_b) \cdot \sin \alpha \approx V \cdot H^2 (\chi_a - \chi_b) \cdot \alpha \quad (2.5)$$

где: χ_a, χ_b — магнитные восприимчивости по соответствующим осям флоккул, кг^{-1} (при $a > b, \chi_a > \chi_b$).

Эта пара сил даже при малых отклонениях приобретает существенные значения. Для магнетитовой флоккулы уже при $\lambda = a/b = 2$ в поле $H = 8 \text{ кА/м}$ она превышает $0,1 \text{ Н/град}$. Это единственная пара сил, действующая на

флокулу в однородном поле, поэтому флокула начинает вращаться синхронно с вектором напряженности поля, отставая от него на небольшой угол, обусловленный сопротивлением среды. Во время этого вращения один конец флокулы прижат к поверхности барабана избыточной магнитной силой; за счет трения между барабаном и флокулой. Последняя начинает катиться по поверхности барабана навстречу вращению магнитной системы, причем скорость ее поступательного движения прямо пропорциональна частоте ее вращения [27].

Таким образом, при сухой сепарации во вращающемся магнитном поле решающее влияние на формирование флокул оказывает центробежная сила, возникающая при вращении флокулы вокруг своей оси.

В.В. Кармазиным была определена зависимость между частотой и длиной флокулы:

$$v = \frac{H}{2\pi a} \sqrt{\frac{\frac{\mu_a}{12\pi(1 + \chi_a N_a)^2} - \frac{4}{3} ac \chi H_0^2 e^{-2c(s-t)}}{0.5\delta}} \quad (2.4)$$

где: v – частота вращения, Гц;

a – длина большой полуоси флокулы, м;

H – напряженность магнитного поля, А/м;

χ – магнитная восприимчивость, m^{-1}

s – шаг полюсов магнитной системы, м;

t – ширина полюса, м;

δ – поверхностное натяжение Н/м

t – время, с;

μ – магнитная проницаемость, Гн/м.

c – коэффициент неоднородности магнитного поля;

Полученное выражение хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными перерасчетом скорости движения флокулы по барабану при данной частоте на длину флокулы (рисунок 2.1.) [27].

Как было показано выше, флоккулы во вращающемся магнитном поле ориентируются по силовым линиям, перекатываясь по поверхности барабана. В точке между полюсами происходит разрушение флоккулы и высвобождение немагнитных частиц, захваченных ею. Чем большее число вращений совершит флоккула в процессе сепарации, тем меньше она будет содержать пустой породы, тем чище будет получен концентрат.

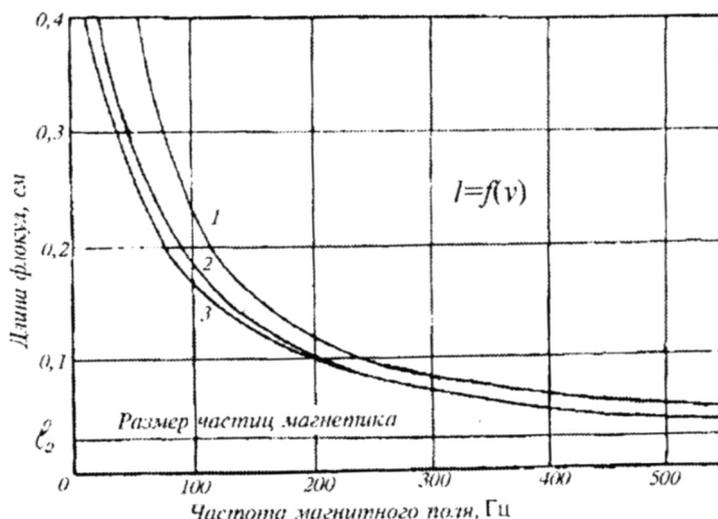


Рисунок 2.1 - Зависимость между частотой магнитного поля и длиной флоккулы.

1-расчет по формуле Э. Лаурилла, 2 - зависимость по формуле В.В. Кармазина, 3 - данные фотоизмерений.

Однако при изучении практически полученных данных после испытаний сепаратора ВСПБМ – 32,5/20 оказалось, что при наложении зависимостей от частоты вращения барабана на частоты вращения магнитной системы происходят более сложные явления [27]. При сухой магнитной сепарации увеличение скорости вращения флоккулы достигается увеличением скорости вращения барабана. При мокрой магнитной сепарации это невозможно из-за сопротивления среды, поэтому частота вращения магнитного поля определяется преимущественно частотой вращения магнитной системы.

В соответствии с формулами Лауриллы и Кармазина [28, 107] длина флокулы обратно пропорциональна частоте вращения вектора напряженности магнитного поля в рабочей зоне. Исследования показали, что полное разрушение флокулы центробежными силами наступает при частотах выше 200 с^{-1} , т. е. флокула должна вращаться со скоростью больше 200 об/мин, и только тогда она распадется на отдельные составляющие ее частицы.

В этом случае захваченные флокулами частицы кварца освобождаются и удаляются в хвосты, а эффективность сепарации η стремится к единице или 100%. Формула для расчета эффективности сепарации на ВСПБМ-90/100 [80] имеет вид:

$$\eta = \eta_0 + \psi\sqrt{\omega} + K_{z.m.} \cdot v_{\bar{o}}/s_d + K_{u.p.} \cdot v_{\bar{o}}/s_p, \quad (2.10)$$

где: η_0 - эффективность сепарации при неподвижной магнитной системе;

ψ - коэффициент, учитывающий свойства флокулы;

ω - угловая частота вращения магнитного поля, рад;

$K_{z.m.}$ и $K_{u.p.}$ - коэффициенты, учитывающие влияние лопастных дефлекторов и индукционной решетки;

$v_{\bar{o}}$ - линейная скорость поверхности барабана при вращении, м/с.

Обычно значения этих коэффициентов достигают значения: $\eta_0=0,3-0,4$, $\psi=0,4-0,6$; $K_{z.m.}$ и $K_{u.p.}$ достигают 0,05 до 0,1, что соответствует уровню их влияния на процесс.

Полученные выводы справедливы для сепарации в вакууме и в определенных условиях при сухой центробежной магнитной сепарации, когда флокула вращается синхронно с вектором напряженности магнитного поля. В жидкости задача многократно усложняется, т.к. разные её слои движутся с разной скоростью и, соответственно, имеют разные режимы течения. Возникают пульсации, воздействующие на обогащаемый материал, и взаимные столкновения флокул, которые могут приводить как к их укрупнению, так и к их распаду. К тому же вязкость пульпы на порядок

выше вязкости воздуха, что предопределяет появление пары сил сопротивления среды, препятствующих вращению флокул магнитным полем. Это вызывает отставание флокулы от исходной точки на поверхности барабана и вектора намагниченности флокулы M от вектора напряженности поля H , на угол ϕ_0 , который увеличивается с увеличением скорости вращения.

Следует учесть, что при вращении длина флокулы будет меньше в воде, чем в воздухе (определяется коэффициентом ψ) за счет сил сопротивления среды, а также вследствие увеличения сил, сжимающих флокулу по направлению к центру, поэтому ее форм-фактор $\gamma = a/b$ будет уменьшаться, стремясь к единице. Таким образом, флокула будет стремиться к шарообразной форме, что также соответствует и энергетическим соображениям, так как прочность флокулы падает с увеличением ее длины, а сопротивление среды увеличивается пропорционально размерам флокулы.

В магнитном поле сепаратора ВСПБМ-90/100 (рис.1.12) рудные частицы флокулируют с образованием множества отдельных прядей флокул, при этом в них захватывается часть сростков и зерен пустой породы. Каждая флокула представляет собой совокупность нескольких десятков или сотен частиц, соединенных цепочкой, которая сориентирована длинной осью в пространстве вдоль силовых линий магнитного поля.

При относительном движении рабочей поверхности барабана и магнитной системы с чередующейся полярностью, вектор напряженности магнитного поля вблизи поверхности совершает вращение, то есть возникает явление «бегущего» магнитного поля. Флокулы, ориентируясь вдоль силовых линий, также совершают вращательное движение вокруг точки касания с рабочей поверхностью. При достаточно большой частоте вращения флокул происходит их разрушение и перегруппировка, что вызывает освобождение из них сростков и частиц пустой породы, которые самотеком разгружаются в нижней части корпуса, а частицы магнетита остаются во флокулах и

транспортируются по барабану к индукционной щетке, где осуществляется вывод концентрата из процесса в конечный продукт.

Для дальнейшего повышения эффективности магнитной сепарации помимо модуляции частоты магнитного поля, которая достигается изменением числа оборотов магнитной системы, впервые была применена модуляция амплитуды (напряженности) магнитного поля. Это было достигнуто за счет применения в магнитной системе с чередующейся полярностью полюсов разной высоты.

Важнейшими параметрами режима сепарации, влияющими на флокулообразование, для сепаратора ВСПБМ–90/100 являются [27]:

- частота вращения барабана сепаратора;
- частота вращения магнитной системы сепаратора навстречу барабану (теоретически для повышения частоты вращения магнитного поля она должна быть максимально возможной);
- удельная производительность сепаратора по твердому;
- содержание железа в исходном продукте;
- содержание твердого в питании.

Статистически обработанные результаты испытаний сепаратора ВСПБМ-90/100 при различных режимах его работы приведены на рисунке 2.2.

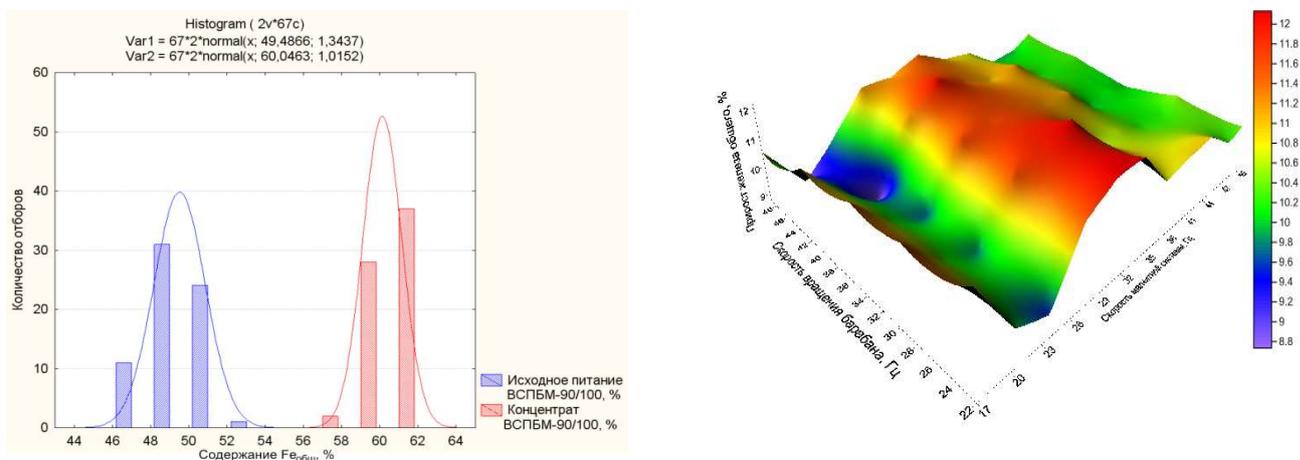


Рисунок 2.2 - Зависимость прироста содержания железа общего в

концентрате от частоты вращения барабана и магнитной системы сепаратора ВСПБМ-90/100

Результаты испытаний сепаратора ВСПБМ-90/100 показали, что применение вращающегося магнитного поля позволяет снизить вредное влияния флокуляции и создает условия, при которых основным критерием разделения становится магнитная восприимчивость частиц, что способствует повышению селективности разделения минералов.

В то же время образование флокул из магнитных частиц при прохождении через рабочую зону сепаратора способствует получению более бедных по содержанию извлекаемых минералов. Это объясняется тем, что магнитная восприимчивость флокул вследствие меньшего коэффициента размагничивания выше, а сопротивление водной среды их движению ниже, чем отдельной частицы.

На качество же магнитного концентрата образование магнитных флокул сказывается отрицательно, так как затрудняет отделение свободных магнитных зерен от их сростков с немагнитными минералами.

2.2 Исследования возможности получения высококачественных магнетитовых концентратов с помощью высокоградиентной сепарации в слабом переменном магнитном поле.

Приведенный выше анализ исследовательских работ и практики обогащения железосодержащих руд показывает, что применение вращающихся магнитных полей не всегда позволяет достигать качества концентратов, необходимого для бездоменной металлургии, и необходимость разработки новых способов сепарации, обеспечивающих высокую эффективность обогащения при максимальной селективности разделения минералов, остается актуальной.

Зависимость степени флокуляции суспензии ψ от напряженности намагничивающего поля H изучалась теоретически и экспериментально с использованием различных методик [29].

На рисунке 2.3 показаны этапы процесса флокуляции в зависимости от величины напряженности магнитного поля.

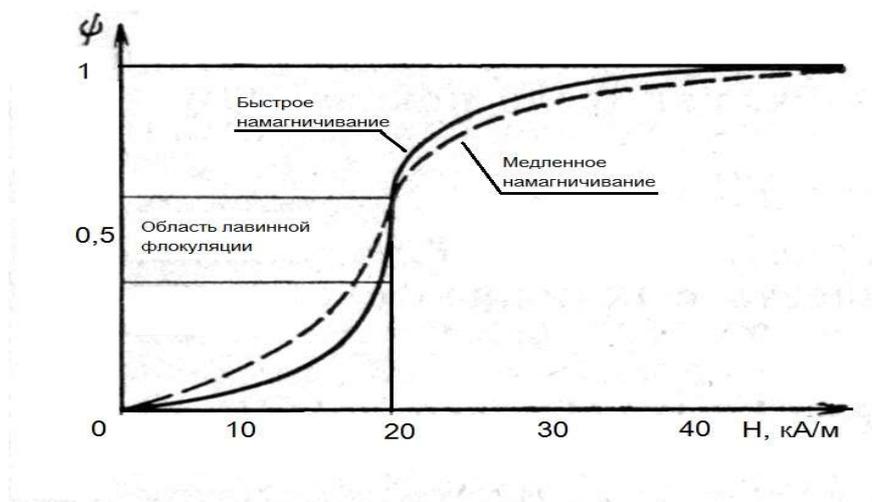


Рисунок 2.3 - Зависимость степени флокуляции частиц магнетита от напряженности поля (сплошная линия — быстрое намагничивание, пунктирная — медленное).

На участке, соответствующем напряженности поля от 0 до 20 кА/м, который соответствует равновесной части процесса, степень флокуляции пропорциональна $F_{\text{магн}}$. В этой зоне $F_{\text{магн}} \leq F_{\text{гм}}$, что обуславливает равновесный характер процесса, так как $F_{\text{магн}}$ пропорциональна H^2 , то $\psi_1 = kH^2$.

При $H_{\text{кр}}$ ($H \approx 20$ кА/м) за счет того, что $F_{\text{магн}}$ становится больше $F_{\text{гм}}$, устойчивость суспензии теряется и происходит свертывание инфлюэнтных объемов суспензии вокруг центров кристаллизации. Однако после резкого увеличения ψ на величину $\Delta\psi$ процесс флокулообразования снова замедляется. Это вызвано значительным снижением концентрации

ферромагнитной фазы в пульпе, что увеличивает расстояние между частицами ($R > R_{кр}$). После этого этапа в пульпе остаются флокулы, размер которых соответствует объему ферромагнитной фазы в инфлюэнтной зоне, и несфлуктурированные частицы ферромагнитной фазы, оказавшиеся за пределами инфлюэнтных зон «сработавших» центров флокуляции. В процессе магнитной сепарации образовавшиеся флокулы притягиваются к барабану или оседают, но так или иначе уходят из суспензии.

Таким образом, при напряженности магнитного поля более 5 кА/м частицы тонкозернистого магнетита начинают объединяться во флокулы, а при напряженности свыше 25 кА/м вся масса магнетита приобретает структуру, состоящую из прижатых друг к другу флокул. Внутри этих флокул заземляются частицы кварца и бедных сростков, что снижает качество магнитного продукта.

В работе Туркенича А.М. [105] отмечается, что одну и ту же магнитную силу можно получить при различных комбинациях величины напряженности и градиента напряженности магнитного поля, т.к. притяжение частиц магнетита к извлекающей поверхности происходит под действием магнитной силы, которая описывается уравнением

$$F = \chi \mu m H \text{grad} H \quad (2.11)$$

где: χ – магнитная восприимчивость частицы, кг^{-1} ;

μ – магнитная проницаемость среды, в которой происходит обогащение, Гн/м;

m – масса частицы;

H – напряженность магнитного поля, А/м;

$\text{grad} H$ – градиент напряженности магнитного поля, А/м^2 .

Следовательно, необходимая магнитная сила может быть получена и в слабом магнитном поле, если градиент напряженности магнитного поля достаточно высок.

Запатентован способ высокоградиентной магнитной сепарации в слабых полях (ВГМССП) [68], позволяющий создать высокий градиент магнитного поля (10^6 - 10^7 кА/м) и получить необходимую величину магнитной силы при значениях напряженности магнитного поля на порядок меньших, чем в барабанных сепараторах. Реализация этого процесса происходит в устройстве [91], в котором высокая неоднородность магнитного поля создается выступами и впадинами рифленых пластин, установленных в пакете с зазором относительно друг друга и помещенных между полюсами магнитной системы. Благодаря низкой напряженности поля значительно уменьшается флокулообразование, а, следовательно, захват зерен кварца и бедных сростков в магнитный продукт.

Исследования, выполненные на лабораторной установке [12], показали, что процесс ВГМССП позволяет при обогащении песков дешламатора 3-го приема ИнГОКа выделять до 21,0% концентрата с содержанием железа 67,3% (прирост качества 4,4%), 13,0% немагнитного продукта (53,6% железа), требующего дополнительного раскрытия и 66,3% промпродукта с содержанием железа 63,3%, предназначенного для флотационного обогащения.

При обогащении руды ПГОКа было получено 45,3% магнитного продукта с содержанием железа 68,2% (прирост качества 2,6%), промпродукта с содержанием железа 65,4% и 4,2% немагнитного продукта, содержащего 39,6% железа.

При обогащении концентрата ЦГОКа, возможно выделить 48,2% высококачественного магнетитового концентрата с содержанием железа 69,7% (прирост качества 1,7%), 3,0% немагнитного продукта содержащего 33,5% железа и 48,8% промпродукта, который по содержанию железа соответствует исходному продукту (67,8% железа) [86].

Полученные результаты показывают, что для процесса ВГМССП также справедлива закономерность: селективность и эффективность разделения минералов при магнитной сепарации снижается с уменьшением различия

между их удельными магнитными восприимчивостями, однородности поля сепаратора по величине магнитной силы $F_M = \mu_0 m H \text{grad} H$ и уменьшением диапазона крупности зерен в исходном материале.

При прочих равных условиях, чем больше удельная магнитная восприимчивость, тем с большей силой магнитное поле воздействует на минеральное зерно и наоборот. Следовательно, чем меньше значение коэффициента селективности магнитного обогащения (отношение магнитных восприимчивостей разделяемых частиц χ_1/χ_2 более магнитных (χ_1) и менее магнитных (χ_2)), тем труднее осуществить разделение минералов. Достичь разделения близких по значению χ , минеральных зерен можно только в однородном по величине магнитной силы поле. При этом магнитные поля современных сепараторов неоднородны не только по напряженности H , но и по магнитной силе. По этой причине при близких значениях χ_1 и χ_2 разделяемых зерен может оказаться, что F_{M1} более магнитного зерна, удаленного от полюса, будет меньше F_{M2} менее магнитного зерна, находящегося у полюса, что приведет к взаимному засорению магнитного и немагнитного продуктов. Практика показывает, что для успешного разделения минералов в современных магнитных сепараторах крайне важно, чтобы коэффициент селективности магнитного обогащения был не менее 3—5.

Но, чем глубже обогащение, тем меньше коэффициент селективности, т.к. требуется отделять более богатые сродки.

При дообогащении товарных концентратов для бездоменной металлургии магнитными методами необходимо разделять минеральные зерна и сродки очень близкие по значению χ . Коэффициент селективности может находиться в пределах 1,5 – 2,2 и в этом случае флокуляция должна быть минимальной.

Проведенный выше теоретический анализ позволил нам предложить новый процесс – высокоградиентную сепарацию в низкоинтенсивном переменном магнитном поле (ВГСНПП). Его отличие от известных

процессов магнитной сепарации заключается в том, что на частицы магнетита и сростки оказывается комплексное воздействие: ослабление влияния магнитной флокуляции и улучшение отмывки слоя в поровых каналах, что позволяет отделять чистые зерна минералов от сростков и зерен пустой породы.

Процесс ВГСНППМП позволяет снизить отрицательное влияние магнитной флокуляции, включает механизм удаления богатых сростков из слоя магнетитового концентрата с использованием высокоградиентных осадительных поверхностей, находящихся в переменном магнитном поле (частота 50Гц) малой напряженности (до 20 кА/м). В этом процессе в отличие от остальных, использующих постоянные и вращающиеся поля было решено применить переменное магнитное поле. Это решение приводит к следующим изменениям:

- во-первых, в результате наличия гистерезиса перемагничивания переменное магнитное поле приводит к вибрации осадительных поверхностей и осевшего на них концентрата, благодаря чему увеличивается подвижность составляющих его частиц.

- во-вторых, при этом сохраняется эффект вращения свободных частиц и агрегатов (все предметы из магнитовосприимчивых материалов вращаются в переменном магнитном поле благодаря наличию гистерезиса перемагничивания).

- в-третьих, применение переменного поля приводит к полному размагничиванию осадительных поверхностей и концентрата, что способствует его лучшему смыву.

- в-четвертых, это решение не требует внесения каких-либо движущихся частей, переменное поле создается неподвижной электромагнитной системой.

Для подавления негативных последствий флокуляции, о которых было сказано ранее, в процессе ВГСНППМП было решено снизить напряженность

магнитного поля менее 20 кА/м. Необходимый уровень извлекающей магнитной силы достигается применением полиградиентной матрицы.

В магнитных сепараторах типа ПБМ напряженность магнитного поля достигает 120кА/м, а градиент напряженности 20-30 кА/м [29], а в сепараторах ВГСНППМП напряженность – 10-20кА/м и градиент до 200 кА/м, т. е. магнитные силы в первом и во втором случае одинаковы.

Применение полиградиентной среды так же имеет многоплановое значение. Кроме создания градиентов магнитного поля, позволяющих создать необходимую магнитную силу для извлечения магнетита, полиградиентная среда разбивает зону сепарации на множество мелких одинаковых ячеек, внутри которых происходит процесс обогащения. Такое разбиение увеличивает вероятность захвата, т.к. путь проделываемый частицей от её текущего местоположения к полюсу значительно сокращается.

Переменное магнитное поле по-разному воздействует на свободные и связанные частицы. Как известно, намагниченная частица не может моментально переориентировать своё магнитное поле, на это требуется некоторое время. Это время тем больше, чем сильнее измельчен материал, так как он обладает большей магнитной жесткостью [10, 28]. В таких условиях изменившемуся внешнему магнитному полю противопоставляется сохранившееся наведенное собственное магнитное поле частицы, и она стремится повернуться таким образом, чтобы сориентироваться по линиям внешнего магнитного поля. Поворот занимает некоторое время, обусловленное сопротивлением окружающей среды. За это время внешнее магнитное поле снова меняет свой знак и процесс повторяется. В итоге магнитные частицы вращаются в переменном магнитном поле подобно якорю известного гистерезисного электродвигателя. Такое вращение полезно тем, что сростки, вращаясь, поворачиваются к полюсу магнита своей немагнитной стороной и могут быть унесены в хвосты вследствие уменьшения силы потокосцепления.

Во-вторых, вследствие того же гистерезиса перемагничивания возникают колебания накопившегося на полюсах материала. При изменении направления магнитного поля частицы, составляющие накопившийся материал не могут поменять своё положение из-за силы трения и отталкиваются от полюса магнита на короткий промежуток времени как единое целое. В результате возникают колебания с частотой внешнего магнитного поля, которые разрыхляют накопившийся слой, он «кипит» и высвобождает механически захваченные немагнитные включения. Подвижность слоя так же позволяет проявиться магнитной силе Архимеда, благодаря которой частицы с меньшей магнитной восприимчивостью выталкиваются в сторону меньшей напряженности поля.

В-третьих, важным фактором является механическая вибрация элементов полиградиентной матрицы под воздействием переменного магнитного поля. Механическая вибрация возникает вследствие её перемагничивания и способствует лучшему перемещению сепарируемого материала по каналам высокоградиентной матрицы. Кроме этого, механическая вибрация способствует лучшей перемешке, перемещению более сильномагнитных частиц в точки наиболее высоким значением напряженности магнитного поля с одновременным вытеснением оттуда менее сильномагнитных частиц.

Глава 3. Теоретический анализ процесса высокоградиентной сепарации в слабом переменном магнитном поле

Для практической реализации предложенного нами нового процесса ВГСНПМП необходимо теоретически оценить его технологические возможности при переработке магнетитовых кварцитов.

Предлагаемый процесс имеет существенные отличия от известных на сегодняшний день процессов обогащения магнетитовых кварцитов. В них

частицы притягиваются из объёма пульпы к полюсу магнита и образуют неподвижный слой, остающийся таким до снятия магнитного поля и смыва. Случайно захваченные немагнитные частицы удерживаются в магнитном слое и попадают в концентрат, снижая его качество.

Главным отличием процесса ВГСНПМП является то, что разделение минералов происходит в переменном магнитном поле с напряженностью, не превышающей 20 кА/м, благодаря чему не наступает лавинная флокуляция пульпы.

Механизм взаимодействия магнитовосприимчивых частиц с переменным магнитным полем зависит от их магнитной восприимчивости и магнитной жесткости. У одного и того же материала эти параметры могут изменяться вследствие их различий по размерам, форме и наличию инородных включений [53] и вследствие этого возникает возможность разделения например, магнетита по размеру (магнитной жесткости). В рамках данной работы этот механизм разделения не рассматривается, т.к. стоит задача максимально полно извлечь магнетит из суспензии. Поэтому мы обращаем внимание на то обстоятельство, что переменное поле вызывает вибрацию полиградиентной матрицы, которая позволяет проявиться магнитной силе Архимеда, выталкивающей на поверхность слоя частицы с меньшей магнитной восприимчивостью, что способствует более точному разделению.

Кроме этого, вследствие постоянной переориентации магнитного поля частицы, находящиеся в относительно свободном состоянии на поверхности накопленного слоя, приобретают вращающий момент. При подаче дополнительной воды вращение способствует эвакуации бедных сростков, что повышает качество концентрата. Подробно вращение магнитных частиц в переменном магнитном поле описано Алленом [110,111].

Закономерности разделения частиц при осуществлении процесса ВГСНПМП достаточно сложны, зависят от многих факторов,

обусловленных характеристиками высокоградиентной среды, параметрами магнитного поля в рабочей зоне и гидродинамическим режимом, определяющими траектории движения частиц вблизи ферромагнитных элементов и динамику их накопления, что требует детального рассмотрения.

3.1. Закономерности разделения магнитных частиц в рабочей зоне ВГСНППМП сепаратора

При осуществлении процесса ВГСНППМП в рабочую зону сепаратора помещаются тела из ферромагнитного материала с низкой коэрцитивной силой, создающие многополюсное рабочее пространство с градиентом магнитного поля, зависящим от формы поверхности полюсов и состава материала, заполняющего это пространство. В точках высокого значения градиента магнитного поля магнитная сила увеличивается на два-три порядка (в зависимости от формы поверхности элементов, создающих полиградиентную матрицу) и осаждение магнетита происходит в этих точках. Следовательно, процесс сепарации можно рассматривать как сумму одинаковых микропроцессов, происходящих в каждой точке с высоким значением градиента магнитного поля. В случае применения в качестве высокоградиентной среды стальных шаров, точки их соприкосновения являются точками рабочего пространства с высоким значением градиента магнитного поля одинаковым во всех точках соприкосновения, ориентированных по направлению линий магнитного поля.

В случае применения стальной ваты нет какой-то преимущественной ориентации составляющих её элементов, поэтому можно говорить о каких-то оценочных величинах, характеризующих процесс, таких как средний градиент магнитного поля, средняя величина площади осадительной поверхности и т.д.

Поскольку объём зоны сепарации разбивается полиградиентной средой на множество микрообъёмов, в которых происходит разделение,

рассмотрим отдельно взятую точку с высоким градиентом магнитного поля. К её поверхности из окружающего объёма, заполненного пульпой, притягиваются магнитовосприимчивые частицы. Этот процесс аналогичен процессу высокоградиентной сепарации в постоянном магнитном поле, применяющемуся для извлечения слабомагнитных материалов [58].

Практически во всех процессах магнитного обогащения работа магнитной сепарации (или флокуляции) A определяется величиной уменьшения магнитостатической энергии ΔE_m . Так как процесс магнитной сепарации носит непрерывно-циклический характер, то работа сепарации совершается магнитной системой сепаратора в процессе притяжения частиц магнитных минералов к полюсам, а затем возвращается магнитной системе при отрыве этих частиц после разгрузки магнитной фракции.

С энергетической точки зрения механическая работа по массопереносу частиц во всех процессах магнитной сепарации всегда сопровождается некоторым снижением общей магнитной энергии сложной системы «полюса - частицы». В целом эта энергия равна:

$$E_M = 0,5 \int_V BHdV \approx const \quad (3.1)$$

E_m при сепарации и магнитной флокуляции частиц изменяется незначительно, и происходит за счет одной ее составляющей — энергии магнитных полюсов или магнитостатической энергии ΔE_m , Дж, в рассматриваемом объеме рабочего пространства - V :

$$E_m = 0,5 J^2 N \cdot V, \quad (3.2)$$

где H, B — соответственно напряженность поля, А/м, и индукция, Тл, в элементах системы — «полюса-частицы», заполняющих рабочее пространство;

J, N — намагниченность (А/м) и коэффициент размагничивания указанных элементов рабочего пространства.

Оценить работу, совершаемую при магнитной сепарации за счет снижения энергии свободных полюсов в результате флокуляции частиц и притяжения их к полюсам, можно следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n E_{M_i}^p + \sum_{j=1}^m E_{M_j}^q - E_M = \Delta E_M \quad (3.3)$$

где $\sum_{i=1}^n E_{M_i}^p + \sum_{j=1}^m E_{M_j}^q$ - суммарная магнитостатическая энергия соответственно магнитных полюсов сепаратора и частиц магнитной фракции, Дж;

ΔE_m — приведенная магнитостатическая энергия полюсов со слоем магнитных частиц, Дж.

Если $\Delta E_m = A$ (работа сепарации), то средняя магнитная сила, действующая в рабочем пространстве по направлению к полюсу (по оси N-S):

$$F_M = -\partial E_M / \partial x \approx -\Delta E_M / \partial x; \quad F_M \approx 0,5 J^2 N S, \quad (3.4)$$

где S — площадь полюсной поверхности, ортогональной силовым линиям, м².

Учитывая, что последняя зависит от «микрорадиуса» элементов поверхности, можно с некоторыми дополнительными оговорками (для случая $N \approx const; J/V = const$) найти зависимость уровня этой силы от радиуса кривизны полюсов [44] (рисунок 3.1).

В случае, когда полюса представлены ферромагнитными шарами, которые упакованы с координационным числом, равным шести,

$$S = V 4\pi r^2 / (2r)^3 = \pi V / 2r; \quad F_M = J^2 N V / 16r \approx C_c / r, \quad (3.5)$$

где r — радиус шара, м;

$V/(2r)^3$ — число шаров в объеме V ,

C_c — постоянная магнитной силы, зависящая от размеров и магнитных свойств материалов полюсов и частиц.

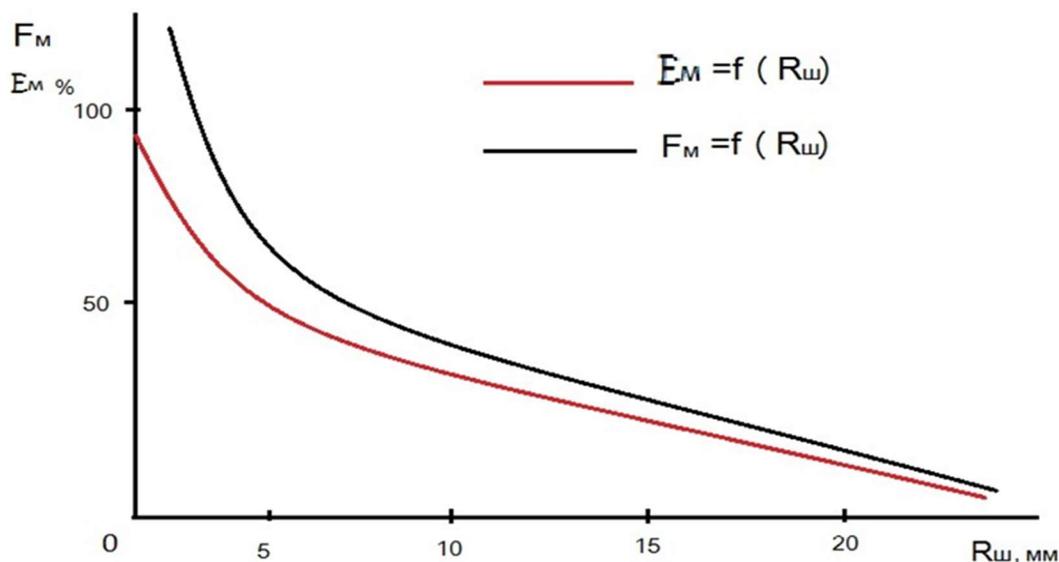


Рисунок 3.1 - Зависимость магнитной силы и извлечения от радиуса кривизны поверхности, образующей полюс магнита. E_M - извлечение, %; F_M - извлекающая сила магнитного поля, A^2/m^2 .

Легко заметить, что внутреннее поле материала полюса зависит от C_c , а внешнее определяется величиной $1/r$, которая не зависит от уровня поля возбуждения и магнитных свойств извлекаемых частиц.

Из этого следует, что при низком уровне напряженности поля возбуждения и высоком градиенте напряженности можно достичь уровня пондеромоторных сил, достаточных для извлечения тонкоизмельченных сильномагнитных минералов, начиная с магнетита. При таком соотношении компонентов магнитной силы засорение магнетитового концентрата будет значительно ниже, чем при обычной сепарации. Это впервые показано экспериментально в работах Туркенича А. М. [12, 13]. Качество товарных концентратов Ингулецкого и Полтавского ГОКов в экспериментах, которые выполнялись на обычных рифленых пластинах роторных сепараторов удалось повысить на 3%.

Рассмотрим плоско-параллельный рабочий зазор сепаратора при отсутствии шаров. В этом зазоре напряженность поля равна:

$$H_0 = \mu_0 \frac{U}{S} \quad (3.6)$$

где: μ_0 – магнитная проницаемость воздушного зазора, Гн/м;

U – магнитодвижущая сила, приложенная к зазору, Н;

S – площадь сечения зазора, перпендикулярная магнитному потоку, м².

После введения в зазор слоя шаров можно записать:

$$H_b = \mu_0 \mu_{ш} \frac{U}{S} \quad (3.7)$$

где: $\mu_{ш}$ – магнитная проницаемость слоя шаров, Гн/м.

Она зависит от способа укладки шаров, от магнитной проницаемости материала шаров. При засыпании металлических шаров в ёмкость при отсутствии внешнего магнитного поля шары укладываются в структуру с координационным числом 8, реже 10.

Средний радиус кривизны осадительной поверхности можно определить исходя из величины необходимого градиента, который должен создавать определенную извлекающую силу, приблизительно равную по значению извлекающей силе в существующих сепараторах серии ПБМ.

$$F = \mu V H grad H \quad (3.8)$$

В серийных магнитных сепараторах, эксплуатирующихся на горных предприятиях, напряженность поля у поверхности составляет 140-160 кА/м. В проектируемом сепараторе ВГСНПМП она составляет не более 20 кА/м, следовательно, для сохранения извлекающей магнитной силы необходимо выполнение равенства

$$H grad H = const \quad (3.9)$$

Следовательно,

$$grad H = \frac{h}{H} grad h, \quad (3.10)$$

где: h -напряженность поля на поверхности барабанного сепаратора, А/м;

H – напряженность поля на полюсах полиградиентного сепаратора, А/м.

Представим водную суспензию магнетита, как взвесь разнонаправленных частиц, магнитные моменты которых направлены хаотично в разные стороны и уравнивают друг друга, не создавая какой-то магнитный поток. Под воздействием внешнего магнитного поля на частицы начинает действовать сила, ориентирующая их параллельно внешнему полю [28].

$$P = VH_{\text{вн}}^2 (\chi_a - \chi_b) \sin \alpha \quad (3.11)$$

где: χ_a и χ_b - магнитная восприимчивость подлинной и короткой осей частицы, а в случае шара по оси легкого и трудного намагничивания соответственно;

α – угол между осью частицы и направлением поля H ;

Когда ориентация закончена, векторы намагниченности частиц становятся коллинеарными, возникает сила кулоновского взаимодействия между полюсами соседних частиц [63,119]:

$$F = \frac{H_{\text{вн}}^2 \chi_a^2 S}{\left[1 + \frac{4\pi}{3}(1 - C_a)\left(\frac{\pi}{6C_x}\right)^{3/2}\right]} \quad (3.12)$$

где C_a и C_x - объемные концентрации ферромагнитной фазы.

Под действием данной силы частицы начинают сближаться с образованием нитеобразных флокул, которые начинают укрупняться. В общем случае в некотором объеме мы можем говорить о сумме сил

взаимного притяжения частиц, которую можно вычислить по формуле:

$$F_{\text{общ}} = \beta H_{\text{вн}} \mu_{\text{ч}}^c S \quad (3.13)$$

где: β - безразмерный коэффициент, учитывающий особенности пространственной структуры суспензии,

$\mu_{\text{ч}}^c$ - магнитная проницаемость объема суспензии, ед.

Образование флокул отрицательно влияет на качество концентрата, вследствие захвата сrostков. Переменное магнитное поле снижает этот

эффект, т.к. в случае, когда магнитовосприимчивая частица вносится потоком в зону действия магнитной системы сепаратора, питающейся переменным током, она сначала притягивается элементу матрицы градиентной магнитной силой и одновременно с этим приобретает наведенный магнитный момент. Элемент матрицы (шар или цилиндр) в этом случае выступает в качестве вторичного магнитного полюса. Достигнув максимума, интенсивность поля снижается по синусоиде (рисунок 3.2), а вместе с ней и магнитная сила притяжения

$$F_{\text{mag}} = \mu_0 \chi m H \text{grad} H \sin \omega t \quad (3.14)$$

где: μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi 10^{-7}$ Гн./м;

χ – удельная магнитная восприимчивость частицы, м³/кг;

m – масса частицы, кг;

H – напряженность магнитного поля, А/м;

ω – частота магнитного поля, 1/с;

t – время, с.

При уменьшении напряженности поля магнитной системы до нуля частица удерживается на поверхности вторичного полюса силой потокосцепления (3.15):

$$F_{\text{пс}} = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (3.15)$$

где: B – магнитная индукция, Тл;

S – площадь контакта частицы, м².

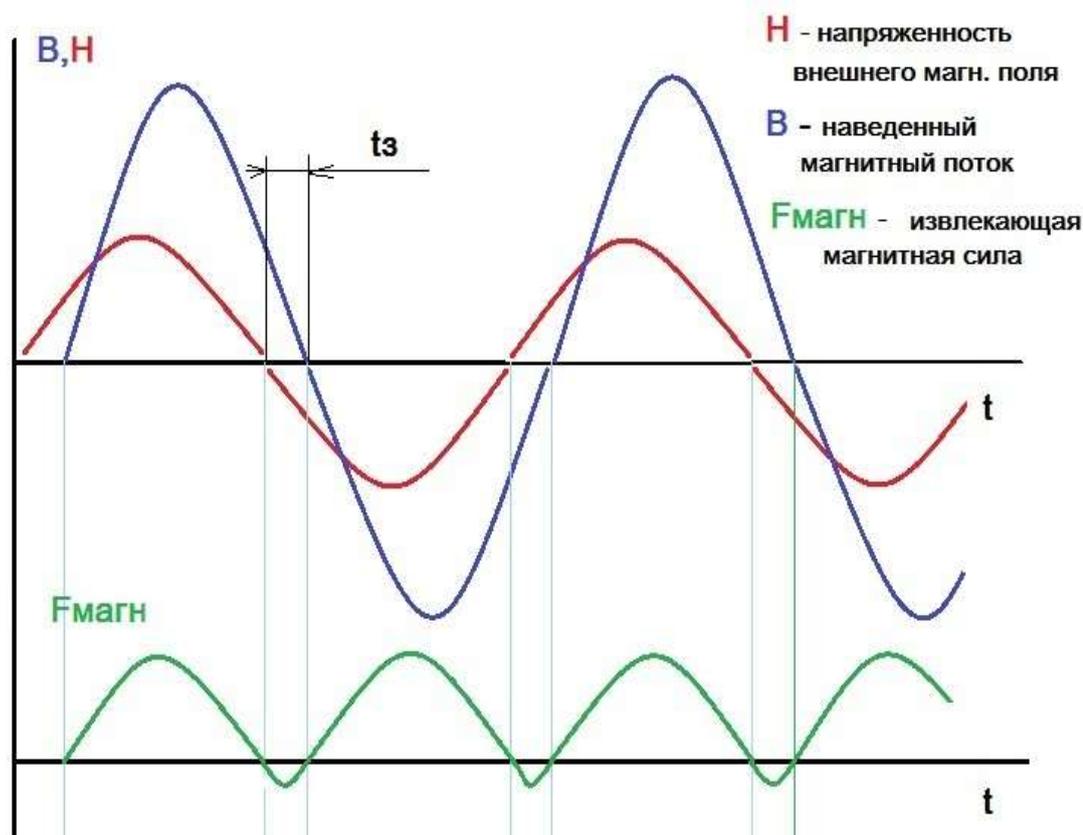


Рисунок 3.2 - Зависимость магнитной силы от параметров переменного магнитного поля.

F_M - извлекающая магнитная сила, A^2/M^3 ; H - вектор поля электромагнита, A/m ; B - вектор намагниченности ферромагнетика, A/m ; t_z - время запаздывания вектора B относительно H , с.

Такой режим удержания присутствует только в момент перехода напряженности поля через нулевое значение. Магнитный поток в этот момент равен остаточному потоку магнитной индукции, приобретенному частицей за цикл намагничивания.

Пройдя через нулевое значение, магнитное поле меняет своё направление на противоположное, но частица, вследствие наличия гистерезиса, не может сразу же изменить свою намагниченность. В этот

момент возникает ситуация, когда векторы магнитной индукции частицы и внешнего магнитного поля направлены противоположно.

Дальнейшее развитие событий зависит от наличия диссипативных сил, действующих на частицу. В случае, когда частица зажата в слое накопленного концентрата, быстрая переориентация её в пространстве невозможна, и она будет отталкиваться от вторичного магнитного полюса системы до тех пор, пока магнитный момент частицы не поменяет своё направление. На это требуется время t_3 (время задержки). После переориентации магнитного поля частицы, векторы магнитной индукции частицы и внешнего магнитного поля будут направлены коллинеарно, и частица снова будет притянута к полюсу магнитной системы.

В результате такого воздействия слой осажденного магнетита подвергается вибрации, а свободные частицы вращаются подобно ротору гистерезисного электродвигателя. Если полиградиентной средой является упругая матрица, например, металлическая вата, то она тоже вибрирует под воздействием переменного магнитного поля и заставляет вибрировать накопившийся материал.

Рассмотрим средний случай, когда частица находится в стесненном состоянии, но имеет некоторую свободу перемещения. Воздействие вибраций на осажденный слой магнетита приводит к тому, что если силы трения относительно невелики, частица будет отталкиваться от

вторичного магнитного полюса с одновременным поворотом в таком направлении, чтобы компенсировать изменение поля магнитной системы. При отсутствии сопротивления среды частица развернулась бы на 180° , но в реальных условиях она поворачивается на некоторый угол α . Вместе с этим домены, составляющие частицу, так же начинают менять

направление и поворачиваются таким образом, что магнитный момент частицы ориентируется на β градусов ближе к новому направлению магнитного поля системы. Полус снова притягивает частицу, но уже повернутую на угол $(180-\beta)$ относительно предыдущего периода. Далее процесс повторяется. Таким образом, за один полный период магнитовосприимчивая частица поворачивается на угол $\alpha = 180 - \beta$.

В стесненных условиях угол $\alpha \rightarrow 0$, а при отсутствии трения угол $\beta \rightarrow 0$ и ограничен только инерцией частицы, которая крайне мала.

Следовательно, скорость вращения частицы или флоккулы зависит от частоты поля возбуждения, коэрцитивной силы сепарируемого материала и силы сопротивления среды. Такое вращение неизбежно приводит к тому, что сродки поворачиваются к полюсу сепаратора своей немагнитной стороной и в момент слабого взаимодействия (при переходе напряженности поля через нулевое значение) могут быть с большой вероятностью вынесены из зоны контакта гидромеханической силой потока.

В случае обычной высокоградиентной сепарации, при накоплении в местах высокого градиента магнитного поля магнетита образуются флоккулы и захваченные сродки после закрепления покрываются слоем чистых магнетитовых зерен, которые их прочно удерживают. В случае ВГСНПМП снижение напряженности поля и вибрации при переменном магнитном поле делают магнетитовый осажденный слой подвижным, и слабомагнитные сродки выталкиваются из него магнитными силами Архимеда:

$$F_{МА} = (\chi_{магн} - \chi_{ср})m \cdot H \cdot gradH, \quad (3.16)$$

где: $\chi_{магн}$ и $\chi_{ср}$ – удельные магнитные восприимчивости магнетита и сродков, м³/кг;

m – масса зерна, кг.

H – напряженность магнитного поля, А/м.

Если $\chi_{ч} > \chi_{ср}$, то магнетитовая частица притягивается ($F_M > 0$), а если $\chi_{ср} > \chi_{ч}$, частица (сросток) выталкивается силой $-F_{MA}$.

Процесс эвакуации сростков из рабочего пространства сепаратора при наложении пульсаций переменного поля показан на рисунке 3.3.

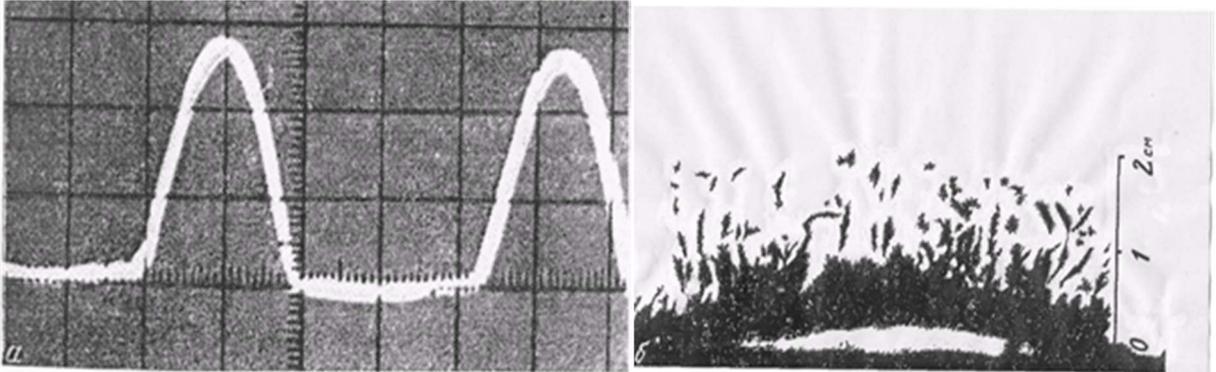


Рисунок 3.3 - Выталкивание магнитных флокул пульсирующим магнитным полем: а – осциллограмма поля; б – момент перемагничивания флокул.

Анализ закономерностей высокоградиентной сепарации в слабом магнитном поле показывает, что эффективность магнитного разделения зависит от силового режима сепарации, а при оптимальных условиях массопереноса – от уровня тяговых пондеромоторных магнитных сил, ответственных за флокуляцию, извлечение или удерживание магнитных минералов. Теоретически и экспериментально установлено, что в процессах сепарации используются в основном две из известных магнитных сил: адгезионная (ближнего действия – потокосцепления) и градиентная (пондеромоторная сила дальнего действия). Первая вызывает флокуляцию магнитных частиц (образование агрегатов – флокул за счет энергии свободных полюсов), а вторая их сепарацию от немагнитных [28].

Первая сила $-F_{n.c}$ не селективна, существует даже в слабых полях, но только при контакте между магнитными частицами, способствует прочному удержанию механически захваченных немагнитных частиц.

$$F_{n.c.} = B^2 S / 2\mu_0 \quad (3.17)$$

где: B – магнитная индукция, Тл;

S – площадь контакта частиц, м²;

μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м.

Вторая сила – селективна, действует на достаточно большом расстоянии от осадительной поверхности (до 100 мм), но требует более высоких значений напряженности магнитного поля – H и ее градиента, а также удельной магнитной восприимчивости – χ .

$$F_{sp.} = G\chi H grad H \quad (3.18)$$

где: G – масса частицы, кг;

χ – удельная магнитная восприимчивость, кг⁻¹.

В случае использования переменного магнитного поля сумму этих сил можно представить как сумму воздействия положительной и отрицательной полуволны магнитной силы (рис. 3.2) Соотношение положительной и отрицательной полуволн составляющей магнитной силы зависит от многих факторов, таких как чистота материала, строение его кристаллической решетки, размеры частиц [10]. Кроме этого, сила магнитного взаимодействия на несколько порядков превышает силу магнитодинамического взаимодействия на частотах менее 1 кГц [82], поэтому расчет сил для дальнейшего анализа разрабатываемого процесса можно вести аналогично расчету сил в постоянном поле, учитывая, что

$$F_M = zF_{ma} \quad (3.19)$$

где F_M – магнитная сила в переменном магнитном поле, Н;

z – коэффициент, учитывающий снижение магнитной силы из-за взаимодействия с переменным магнитным полем, д.е.;

F_{ma} – амплитудное значение магнитной силы, Н.

3.2 Гидродинамика движения пульпы в высокоградиентных средах

Полиградиентная среда, находящаяся в рабочей зоне сепаратора, является пористой средой, важной структурной характеристикой которой является удельная поверхность пор – отношение общей поверхности металлических тел к объему пористого пространства среды:

$$S_s = G(1 - k_{\pi}) / (k_{\pi} D_{\pi}), \quad (3.20)$$

где G – масса полиградиентной среды, кг;

k_{π} – коэффициент пористости. Коэффициент пористости не зависит от диаметра шара, т.к. $k_{\pi} = (1 - \delta_0 / \rho)$, где δ_0 , ρ – соответственно насыпная и средняя плотность материала, кг/м³;

D_{π} – диаметр шара, м.

Радиус окружности, вписанный между четырьмя соприкасающимися шарами, равен $r = 0,41 D_{\pi} / 2$, а радиус окружности, вписанной между восемью соприкасающимися шарами, равен $r = 0,155 D_{\pi} / 2$. Следовательно, частицы, диаметр которых $d \geq 0,15$, забивают полиградиентную среду.

Гидравлический радиус Ω (отношение всех пор полиградиентной среды к общей поверхности ее элементов):

$$\Omega = k_{\pi} D_{\pi} / [G(1 - k_{\pi})] \quad (3.21)$$

Эквивалентный или эффективный диаметр равный учетверенному гидравлическому радиусу [28]:

$$d = 4\Omega = 2k_{\pi} D_{\pi} / [3(1 - k_{\pi})] \quad (3.22)$$

Движению потока жидкости в слое шаров препятствует сила сопротивления $F_{\text{ГМ}}$, зависящая от диаметров шаров и режимов движения.

По закону Стокса (крупность частиц составляющих среду < 50 мкм)

$$F_{\text{ГМ}} = 3\pi\mu d\nu \quad (3.23)$$

где μ – вязкость пульпы, Па/с;

d – диаметр частицы или шара, м;

v – линейная скорость пульпы, м/с;

По закону Ньютона (крупность частиц составляющих среду >50 мкм)

$$F_{\text{гм}} = \psi S v^2 \Delta / 2 \quad (3.24)$$

ψ – коэффициент сопротивления, ед;

Δ – плотность движущейся среды, кг/м³;

v – относительная скорость движения частицы, м/с;

S – площадь сечения частицы, м².

Если движение пульпы через слой шаров подчиняется линейному закону фильтрования Дарси, скорость фильтрования определяется по уравнению Козени:

$$v = a m^3 \Delta p / (S_v^2 \mu L), \quad (3.25)$$

где a – коэффициент формы порового канала ($a = 0,5 - 0,6$);

Δp – перепад давления на слое полиградиентной среды, Па;

L -длина поры, м;

Длина поры всегда больше высоты слоя полиградиентной среды h , т.е.

$$L = \alpha h.$$

Так как шары, составляющие матрицу, имеют относительно большие размеры, режим течения жидкости переходит в турбулентный режим, начало которого определяется числом Рейнольдса $Re_{\text{ф.кр.}} = 7 - 9$. При $10 < Re_{\text{ф}} < 10000$ скорость фильтрования можно определить по формуле [78]:

$$v = K I^m, \quad (3.26)$$

где K – коэффициент фильтрации;

I – гидравлический уклон;

m – коэффициент, ($m < 1$).

Реальный гидромеханический режим протекания пульпы в процессе полиградиентной сепарации (содержание твердого 20 – 35%) через слой шаров (диаметром 4 – 9 мм) не может быть описан линейным законом фильтрования. В реальных условиях имеют место очень высокие скорости движения пульпы (2 – 20 см/сек) относительно слоя шаров, появляются вихревые ускорения, за зонами контактов теряется устойчивость движения, и поток движется в турбулентном или переходном режиме.

Таким образом, режим движения жидкости в поровом канале можно представить как комплексный, имеющий в центре канала турбулентную зону, скорость в которой определяется формулой Краснопольского [44]:

$$V = K_T \sqrt{2gH} \quad (3.27)$$

где: K_T – коэффициент Краснопольского ;

V – скорость частицы, м/с;

H – напор, м.

и переходный слой к стенкам и точкам контактов шаров, от которых скорость растет в направлении к центру канала по логарифмическому закону Прандтля [29]:

$$V = \frac{1}{\vartheta} \sqrt{\frac{\sigma_{ж}}{\delta}} \ln x \quad (3.28)$$

где: ϑ – эмпирический коэффициент, ед;

$\sigma_{ж}$ – напряжение турбулентного трения, кг/мс²;

δ – плотность жидкости, кг/м³.

x – расстояние от стенки шара (точки контакта)

перпендикулярно оси шаров (поперек струи), м;

Это же уравнение может быть представлено в виде [44]:

$$v = (\sigma_{ж}/\delta)^{1/2} [5,75 \lg(x/v) (\sigma_{ж}/\delta)^{1/2} + 5,5], \quad (3.29)$$

где v – кинематический коэффициент вязкости пульпы, $\text{м}^2/\text{с}$.

Экспериментальные исследования [35] показывают, что в основном объеме поровых каналов между шарами для частиц крупностью <100 мкм гидромеханические силы превалируют над магнитными.

Для реализации элементарного акта сепарации (искривления траектории движения магнитной частицы в область малых скоростей у точки контакта для ее закрепления) необходимо отклонить траекторию частицы на угол до 45° .

Изучение эпюры скоростей в поровом канале (рисунок 3.4.) позволяет утверждать, что зона магнитного захвата (магнитоаттрактивная зона) ограничена областью преобладания магнитных сил над гидромеханическими, т.е. приконтактной областью (зоной ламинарного подслоя). Зная радиус этой зоны, легко определить объем и содержание магнитной фракции, которую можно извлечь одним контактом шаров [44].

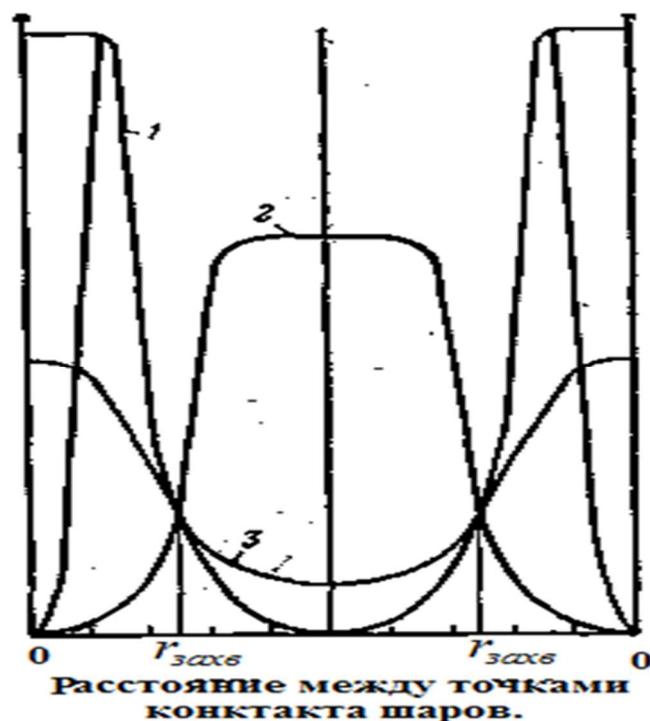


Рисунок 3.4 - Эпюры магнитных F_M (1), гидромеханических $F_{ГМ}$ (2) сил и напряженностей поля H (3) в поровом канале полиградиентной среды

Соотношение ламинарного и турбулентного режимов движения пульпы в каналах полиградиентной среды определяется скоростью пульпы и ее вязкостью, поэтому выход магнитной фракции в значительной мере зависит от параметра Рейнольдса. При ламинарном движении пульпы с малыми скоростями осаждение магнитных частиц сопровождается агрегацией с захватом немагнитных частиц.

Увеличение турбулентности потока препятствует захвату немагнитных и снижает вероятность захвата слабомагнитных частиц, что сопровождается снижением выхода магнитной фракции. Повышение эффективности разделения в этом случае наблюдается при увеличении скорости потока пульпы до 14 – 15 см/с.

Дальнейшее повышение скорости (до 20 см/с) вызывает полную турбулизацию потока и снижает эффективность разделения минералов. Это объясняется тем, что пульсационные скорости турбулентных потоков вызывают появление гидромеханических сил, превышающих магнитные воздействия на частицы, и вероятность их захвата (особенно для мелких классов) резко снижается. Оптимальным диапазоном скоростей пульпы в поровых каналах шарикового слоя является 10 – 15 см/с [58].

Весьма существенное влияние на эффективность высокоградиентной сепарации в незатопленном слое шаров оказывают капиллярные силы. Большинство минералов, являются гидрофильными и для них переход из водной фазы в воздушную связан с преодолением весьма большой силы, возникающей за счет поверхностного натяжения воды

$$F_{\text{пов}} = G\sigma_{\text{г-ж}}\cos\theta/(dg\delta), \quad (3.30)$$

где $\sigma_{\text{г-ж}}$ - поверхностное натяжение на границе «жидкость – газ»,

Н/м;

θ – угол смачивания минерала частицы, град.;

d – диаметр, м;

δ - плотность частицы, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Из выражения (3.28) следует, что $F_{\text{пов}}$ может значительно влиять на извлечение тонких частиц, а т.к. высокоградиентные среды являются гидрофильными и обладают высокой кривизной и неоднородностью поверхности, то в слое капиллярно-стыковой воды благодаря большому значению силы $F_{\text{пов}}$ остается значительное количество тонкоизмельченного кварца, силикатов, карбонатов и гидроокислов.

3.3 Анализ моделей процесса высокоградиентной магнитной сепарации

В рабочих зонах реальных высокоградиентных сепараторов движутся потоки пульпы, содержащие частицы, значительно отличающиеся по крупности, удельной магнитной восприимчивости и плотности. В этих условиях траектории движения частиц в поровых каналах высокоградиентной среды не совпадают с траекториями, рассчитанными по приведенным выше формулам.

Поэтому в работах Н.К. Коллана, В.В. Кармазина и А.М. Туркенича [44,114,105], анализ процесса высокоградиентной сепарации осуществлялся на основе феноменологического подхода. В этом случае процессы, происходящие в рабочих зонах высокоградиентных магнитных сепараторов, описываются с помощью дифференциальных уравнений, моделирующих процесс, а значения параметров модели определяются экспериментально.

Первая феноменологическая модель процесса ВГМС разработана Н. Колланом [114]. Концентрация частиц C и количество извлеченных частиц N , согласно этой модели, определяются следующими уравнениями:

$$C(x, T) = C_{in} \exp[(x_s - x)\lambda] \quad (3.31)$$

$$N(x, T) = T_s \exp[(x_s - x)\lambda] \quad (3.32)$$

где C_{in} - концентрация частиц на входе в рабочую зону;

N - уровень насыщения матрицы магнитным продуктом;

x_s - длина части рабочей зоны, насыщенная магнитным продуктом.

Модель А.М. Туркенича[105] рассматривает высокоградиентную магнитную сепарацию как циклический процесс, описываемый дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial \tau \partial y} + \frac{k}{u} \frac{\partial P}{\partial \tau} = 0, \quad (3.33)$$

где P – концентрация частиц в пульпе, % ;

k – интенсивность извлечения, ед;

u - скорость потока пульпы, м/с.

$$k = \frac{R_0^2 u}{R_n^2 y_c} \left[1 - \left(\frac{R_c}{R_m} \right)^3 \right]; \quad (3.34)$$

где R_0 - радиус захвата частиц ферромагнитным элементом, м;

R_c – радиус зоны, заполненной накопленным материалом, м;

R_m – максимальный радиус зоны накопления, м.

Радиус зоны захвата определялся путем решения дифференциальных уравнений движения частицы в рабочей зоне сепаратора, максимальный радиус зоны накопления – из условия равновесия частицы на поверхности тела накопления. Величина гидравлической силы, действующей на частицу, определялась по закону Стокса.

Предложенная модель была реализована для рабочей зоны высокоградиентного магнитного сепаратора со сферическими ферромагнитными элементами для двухкомпонентной смеси.

В работе В.В. Кармазина [44] представлена феноменологическая модель, позволяющая оценивать извлечение магнитной фракции в рабочей зоне ВГМС. Изменение концентрации магнитной фракции в пульпе, проходящей через сепарационную зону, происходит во времени по экспоненциальному закону:

$$K(x, T) = K_0 \exp(K_c \cdot x \cdot t), \quad (3.35)$$

где K_0 - начальная концентрация магнитной фракции в пульпе, %;

K_c - коэффициент сепарации (имеет смысл удельного извлечения на единицу высоты рабочей зоны в единицу времени);

t – время сепарации, с.

Учитывая, что извлечение зависит от концентрации частиц, которая снижается с увеличением высоты матрицы, можно записать

$$\frac{dq}{dh} = -Kq, \quad (3.36)$$

где K - коэффициент сепарации;

q - масса магнитной фракции, кг, на высоте h слоя матрицы, м.

Откуда:

$$q = C \cdot e^{-kh} \quad (3.37)$$

При $h = 0$, $C = q_0$ с учетом наличия насыщенного слоя матрицы магнитной фракцией h_s эта зависимость принимает вид:

$$q = q_0 \left(\frac{h_s}{h} + e^{-kh} \right). \quad (3.38)$$

Извлечение магнитной фракции определяется из выражения

$$\varepsilon = (q_0 - q)/q_0. \quad (3.39)$$

Отсюда

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_s}{h} - e^{-kh}, \quad (3.40)$$

где q_0 - масса магнитной фракции в исходном продукте, кг.

Последнее выражение позволяет рассчитать высоту рабочего пространства, необходимую для достижения заданного извлечения [59].

Используя приведенные выше зависимости, В.В. Кармазин разработал зонно-вероятностную модель процесса ВГМС. Основные положения модели следующие:

- сепарационная зона состоит из n сепарационных слоев, расположенных последовательно по ходу передвижения разделяемого потока частиц;

- коэффициент захвата или так называемая "вероятность захвата" определяется из соотношения площадей сечений захвата и общей площади:

$$P_z = S_{захв.}/S_{общ} \quad (3.41)$$

- зависимость извлечения от числа сепарационных слоев и времени сепарации определяется из выражения:

$$\varepsilon = 1 - (1 - P)^n = 1 - \exp(-kt); \quad (3.42)$$

- сечение площади захвата определяется из условия

$$F_M \geq F_{z.d}, \quad (3.43)$$

где F_M - магнитная сила, действующая на частицу, Н;

$F_{z.d}$ - гидродинамическая сила, Н.

Зонно-вероятностная модель позволяет оценить влияние количества сепарационных слоев или связанную с ним высоту рабочей зоны на извлечение магнитной фракции.

В слое шаров или других элементов высокоградиентной (полиградиентной) среды зона магнитного захвата (магнитоатрективная зона) ограничена областью преобладания магнитных сил над гидромеханическими, т. е. приконтактной областью (зона ламинарного подслоя). Зная радиус этой зоны, легко определить объем и содержание магнитной фракции, которую можно извлечь одним контактом шаров.

Отношение площади магнитоадгезионного пространства, в котором захват магнитных зерен происходит со 100%-ной вероятностью к общей площади порового канала в магнитоадгезионной среде (например, в слое шаров), является по существу вероятностью P_z , захвата магнитного зерна в одном цикле.

Эта вероятность относится к зернам с максимальными магнитными свойствами, определяемыми содержанием ферромагнитного минерала, т. е. зернами чистого минерала (магнетита, гематита, вольфрамита и т. п.). Для сростков с пустой породой: кварц, граниты, глина и др. зона захвата уменьшается соответственно снижению содержания ферромагнитных минералов $\beta_{фер.мин}$ в них:

$$P_3 = K_\beta \cdot S_{\text{захв.}} / S_{\text{общ.}}, \quad (3.44)$$

где $K_\beta = \beta_{\text{ср.}} / \beta_{\text{фер.мин.н.}}$ (Для магнетита $K_\beta = 1$).

В этом случае вероятность того, что зерно не будет захвачено (вероятность проскока):

$$P_{\text{нз.}} = (1 - K_\beta P_3), \quad (3.45)$$

а для n слоев согласно правилу перемножения последовательных частных вероятностей суммарная вероятность захвата равна:

$$P_3 = (1 - P_3)^n \quad (3.46)$$

На рисунке 3.5 показано семейство кривых $\varepsilon = f(n)$ для ряда значений P , рассчитанное теоретически и проверенное экспериментально [44]. В реальных условиях P зависит от напряженности поля, диаметра шаров и скорости движения пульпы в каналах, а n непосредственно связано с общей длиной (высотой h) рабочего пространства:

$$h = n \cdot D_{\text{ш}} \quad (3.47)$$

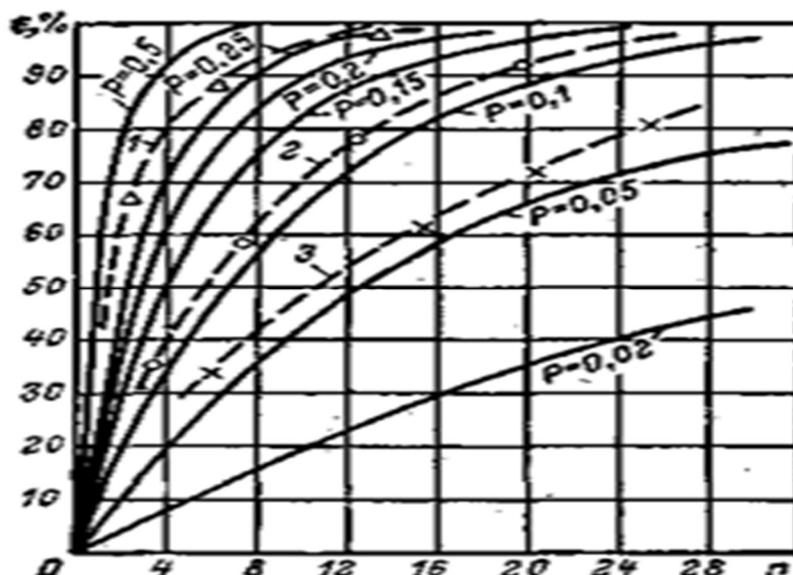


Рисунок 3.5 - Зависимость извлечения ε от вероятности захвата магнитных зерен P и числа зон n сепарации: сплошная линия расчетные данные; пунктирная — экспериментальные результаты для шаров диаметром соответственно: 4 мм (1); 8 мм (2); 16 мм (3)

Зависимость вероятности извлечения от времени сепарации t и числа слоев шаров n можно определить из формул (3.48) и (3.49):

$$\varepsilon = 1 - (1 - K_{\beta} \cdot P_3)^n = 1 - \exp(-kt); \quad (3.48)$$

$$(1 - K_{\beta} \cdot P_3)^n = \exp(-kt); \quad (3.49)$$

$$K_{\beta} \cdot P_3 = 1 - \exp(-kt/n) \quad (3.50)$$

При $t \rightarrow 0$ $P_3 \rightarrow 0$, а увеличение времени пребывания зерна в рабочей зоне повышает вероятность его извлечения. Для каждого отдельного слоя вероятность извлечения зависит только от коэффициента сепарации и времени.

Исходя из формулы (3.45), определяющей извлечение для n слоев, извлечение $\varepsilon_i(\chi)$ для одного слоя (элементарной зоны) можно определить как

$$\varepsilon_i(\chi) = 1 - (1 - \varepsilon(\chi))^{1/n} \quad (3.51)$$

Откуда после логарифмирования

$$n = \ln(1 - \varepsilon) / \ln(1 - \varepsilon_i), \quad (3.52)$$

По этой формуле можно определить необходимое количество слоев (элементарных зон) для получения заданного извлечения $\varepsilon(\chi)$.

В реальных условиях извлечение $\varepsilon(\chi)$ зависит от напряженности магнитного поля, диаметра шаров и скорости движения пульпы в каналах, а n непосредственно связано с длиной (высотой h) рабочего пространства ($h = nD_{ш}$).

От времени пребывания пульпы в рабочем пространстве зависит эффективность разделения минералов и производительности сепаратора, поэтому для описания процессов обогащения широко используются кинетические зависимости, позволяющие анализировать параметры неоднородных массопотоков во времени.

Для описания кинетики извлечения магнитных минералов в процессе магнитной сепарации применяются экспоненциальные феноменологические уравнения.

Например, уравнение Ерофеева-Колмогорова [44]

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kt^n), \quad (3.53)$$

где k – коэффициент сепарации (удельное извлечение магнитной фракции на единицу высоты слоя шаров в единицу времени);

t – время протекания процесса, с;

n – экспериментально определяемый коэффициент.

Уравнение позволяет прогнозировать извлечение во времени, не отражая влияния на процесс таких характеристик, как магнитная восприимчивость извлекаемых частиц, напряженность магнитного поля и т.п.

Более информативной является кинетическая модель Мостыки Ю.С. [55]. Модель предназначена для расчета ожидаемых технологических показателей процесса разделения слабомагнитных материалов в рабочих зонах мокрых высокоградиентных магнитных сепараторов с ферромагнитными элементами цилиндрической формы при различных режимах сепарации и оценки изменения этих показателей в зависимости от длительности непрерывного протекания процесса.

Модель была разработана при следующих допущениях:

- частицы не образуют флоккул в рабочей зоне сепаратора;
- частицы, удерживаемые элементами матрицы и движущиеся в потоке пульпы, не влияют на распределение характеристик магнитного поля в рабочей зоне;
- распределение частиц по объему в потоке пульпы при переходе от одного сепарационного слоя к следующему становится равномерным.

Объем зоны накопления $V_{\text{нак}}(f)$ фракции f определяется как произведение площади сечения зоны накопления для данной фракции $S_{\text{нак}}(f)$ на длину цилиндрического элемента u_2 и количество m этих элементов в одном сепарационном слое:

$$V_{\text{нак}}(f) = S_{\text{нак}}(f) \cdot u_2 \cdot m \quad (3.54)$$

Объем накопленного в данном слое i материала $V_i(i, t)$ за время t вычисляется по формуле:

$$V_1(i, t) = \int_{t=0}^{t=T} \sum_{f=1}^k \frac{Q_{\text{маг}}(f, i)}{\rho_f} dt, \quad (3.55)$$

где k – количество фракций в разделяемом материале.

Зависимости технологических показателей от времени определяются из соотношений:

- выход магнитного продукта:

$$\gamma_{\text{маг}}(t) = \frac{\int_{t=0}^{t=T} \sum_{f=1}^k \sum_{i=1}^n Q_{\text{маг}}(f, i) dt}{\int_{t=0}^{t=T} Q dt} \cdot 100\%; \quad (3.56)$$

- содержание полезного компонента в магнитном продукте:

$$\beta_{\text{маг}}(t) = \frac{\int_{t=0}^{t=T} \sum_{f=1}^k \sum_{i=1}^n Q_{\text{маг}}(f, i) \beta(f) dt}{\int_{t=0}^{t=T} \sum_{f=1}^k \sum_{i=1}^n Q_{\text{маг}}(f, i) dt} \cdot 100\%, \quad (3.57)$$

- извлечение полезного компонента в магнитный продукт:

$$\varepsilon_{\text{маг}}(t) = \frac{\int_{t=0}^{t=T} \sum_{f=1}^k \sum_{i=1}^n Q_{\text{маг}}(f, i) \beta(f) dt}{\int_{t=0}^{t=T} Q \beta_{\text{cp}} dt} \cdot 100\%. \quad (3.58)$$

Характеристики немагнитных продуктов определяются по аналогичным формулам.

Модель дает возможность построения сепарационных характеристик рабочей зоны сепаратора при заданных параметрах сепарации в момент времени t .

Данная модель представляет собой алгоритм расчета технологических показателей процесса ВГМС на основе использования интегральных

кинетических зависимостей основных показателей для узких классов. В качестве исходных данных используется двумерный массив, который описывает свойства каждой фракции с узким диапазоном изменения крупности и удельной магнитной восприимчивости и основные режимные параметры процесса сепарации.

Данная модель реализована в виде расчетной программы на языке Visual Basic, представляющей результаты расчета основных технологических показателей в виде таблиц значений выходных технологических показателей и графиков зависимости этих величин от длительности непрерывного цикла сепарации.

К недостаткам модели следует отнести необходимость большого количества исходных данных.

На траекторию частиц, находящихся в плотном массопотоке, влияет их взаимодействие друг с другом посредством столкновений, турбулентных пульсаций и т.д. Это явление позволяет рассматривать разделение частиц как макродиффузию в силовом поле, моделируя количественные связи только между усредненными характеристиками поля и свойствами сырья.

В соответствии с основным законом массопередачи [43] количество извлекаемых к данному моменту магнитных частиц $d\alpha/dt$ пропорционально их текущей концентрации (содержанию) α' , в рабочем пространстве и скорости их извлечения K_n , зависящей от равнодействующей разделяющих сил F_p :

$$d\alpha/dt = K_n \alpha' \quad (3.59)$$

$$\text{где } K_n = f(F_p) \quad (3.60)$$

В этом случае основное уравнение динамики разделения минералов в процессе полиградиентной сепарации можно записать так:

$$F_r + F_m - F_a - F_{am} + G - F_u - F_c = 0, \quad (3.61)$$

где: G - сила тяжести, Н;

F_a - сила Архимеда, Н;

F_{am} - сила Архимеда магнитная, Н;

F_m - магнитная сила, Н;

F_c - сила сопротивления за счет движения среды, и турбулентных пульсаций, Н;

пульсаций, а также соударения самих частиц,

F_r — градиентная сила, возникающая за счет градиента концентраций частиц, Н;

F_u — сила инерции, Н;

Если исходный материал имеет крупность -44 мкм, силами инерции столь малых частиц можно пренебречь.

Если предположить, что магнитная сила и магнитная сила Архимеда не зависят от скорости частиц для любой точки рабочего пространства, то все механические силы можно свести к единой равнодействующей и считать рабочее пространство полем действия этой силы, вынуждающей диффундирующие частицы совершать направленный дрейф к полюсу сепаратора.

В этом случае уравнение (3.22) принимает вид:

$$R_{mex} - F_{gp} - F_c = 0 \quad (3.62)$$

где R_{mex} - сумма механических сил, Н;

F_{gp} - градиентная сила, Н;

F_c - сила сопротивления, Н.

В этом уравнении особое внимание заслуживают силы сопротивления и градиентные (диффузионные) силы, так как правильность их учета влияет на конечные выводы.

При оценке сепарационного (разделительного) массопереноса скорость среды можно не учитывать, равно как и скорость изотропных пульсаций при большой их частоте, тогда сила сопротивления будет равна:

$$F_c = -(\alpha_1 + \alpha_2)v = -\alpha v, \quad (3.63)$$

где: α_1 - коэффициент сопротивления столкновений частиц;

α_2 -коэффициент сопротивления среды, зависящий от размеров частиц и вязкости среды, кг/с;

v —скорость частицы, м/с.

Градиентная сила, действующая на единицу объема, таким образом, будет равна:

$$F_{ep} = -\frac{K_m}{C_m(x)} \text{grad} C_m(x), \quad (3.64)$$

где K_m - коэффициент подвижности частиц, пропорциональный средней кинетической энергии их хаотического движения;

m - объемная доля твердого в пульпе, %.

Градиентная сила, стремясь выровнять концентрации магнитных зерен вблизи полюса, препятствует процессу сепарации. В общем случае $C(X, Y, Z)$, поэтому в дальнейшем изложении будем обозначать просто C_m , имея в виду функцию концентрации магнитной фракции от координат.

Теперь есть основания записать уравнение (3.64) следующим образом:

$$R_{\text{мех}} - \alpha v - K_m \text{grad} C_m / C_m = 0, \quad (3.65)$$

где $R_{\text{мех}}$ - сумма механических сил, Н;

α – суммарный коэффициент сопротивления, кг/с;

v – средняя скорость частицы, м/с;

K_m - коэффициент подвижности частиц, ед.;

C_m – объёмная концентрация частиц, м^{-3} .

Откуда легко найти скорость направленного дрейфа частиц

$$v = R_{\text{мех}} / \alpha - K_m \text{grad} C_m / \alpha C_m \quad (3.66)$$

Подставляя найденное значение скорости в выражение закона сохранения вещества (дифференциальная форма записи)

$$dC / dt = -\text{div}[C_m v] \quad (3.67)$$

где t – время, с;

получим уравнение диффузии в силовом поле или уравнение Эйнштейна-Фоккера-Планка, справедливое только при линейной зависимости силы сопротивления от скорости:

$$dC_m / dt = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2} K_m \text{divgrad} C_m - \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2} \text{div}[R_{\text{мех}} C_m], \quad (3.68)$$

где: α_1 - коэффициент сопротивления столкновений частиц, кг/с,

α_2 - коэффициент сопротивления среды, зависящий от размеров частиц и вязкости среды, кг/с.

После небольших преобразований уравнение (3,68) можно записать так:

$$dC_m / dt = \frac{K_m}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{\partial^2 C_m}{\partial t} - \frac{R_{\text{мех}}}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{\partial C_m}{\partial t} \quad (3.69)$$

Выразим $R_{\text{мех}}$ через другие величины, характеризующие процесс магнитной сепарации:

$$R_{\text{мех}} = (\chi - \chi_{\text{сп}}) H \frac{\partial H}{\partial x} \sin(\omega t) - (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (3.70)$$

где: χ – удельная магнитная восприимчивость частиц, м³/кг;

$\chi_{\text{сп}}$ – удельная магнитная восприимчивость среды, м³/кг;

ω - частота магнитного поля, с⁻¹;

H - напряженность магнитного поля, А/м;

Тогда уравнение (3.67) примет вид:

$$dC_m / dt = \frac{K_m}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{\partial^2 C_m}{\partial t} - \left[\frac{\chi_m - \chi_{cp}}{\alpha_1 - \alpha_2} H \frac{\partial H}{\partial x} \sin(\omega t) - v \right] \frac{\partial C_m}{\partial t}. \quad (3.71)$$

α_1 существенно преобладает в зоне больших градиентов, а α_2 – в свободной части канала, причем в переменном поле α_1 больше зависит от вибраций, чем α_2 , так как удерживающая магнитная сила зависит от частоты переменного магнитного поля и магнитной жесткости обогащаемого материала.

В сочетании с краевыми (начальными и граничными) условиями:

$$C_m(0, r) = \delta(r - 0), \quad (3.72)$$

$$\int_0^r C(t, x) dx = 1, \quad (3.73)$$

$$C_m(t, x)|_{x \rightarrow +\infty} = 0, \quad (3.74)$$

$$\frac{\partial C(t, x)}{\partial x} |_{x \rightarrow +\infty} = 0, \quad (3.75)$$

уравнение (3.71) является математической моделью процесса высокоградиентной сепарации.

Поскольку при выводе уравнения Эйнштейна-Фоккера-Планка использовалась линейная зависимость силы сопротивления среды от скорости движения частиц (закон Стокса), что справедливо только при ламинарном режиме движения, не корректно его использовать для описания турбулентного массопереноса, который имеет место при протекании пульпы через полиградиентную среду.

В реальных сепараторах динамика движения турбулентных потоков пульпы через поры высокоградиентной среды очень сложна и трудно поддается математическому описанию, т.к. скорости и плотности потоков

частиц в различных точках рабочего пространства не одинаковы, а магнитные свойства частиц изменяются во времени в зависимости от интенсивности поля, концентрации и формы сродков. На процесс влияет не только магнитная восприимчивость зерен, но и их магнитная жесткость, флокуляция, дефлокуляция, число перемагничивания и др.

Для компенсации этих противоречий О. Н. Тихонов предложил общее решение уравнения (3.69) через интеграл вероятности [102, 103]. В этом случае для извлечения частиц с удельной магнитной восприимчивостью χ это решение имеет вид:

$$\varepsilon_m(\chi) = 0,5 + 0,5\Phi\left[\sqrt{A\gamma_{исх}}(\chi - \bar{\chi}_c)\right], \quad (3.76)$$

где ε_m – извлечение магнитной фракции, д.е;

Φ – интеграл вероятности;

$A = (\alpha D)^{-1} h a$, где α – коэффициент сопротивления среды;

D – коэффициент диффузии зерен;

H – толщина (глубина) постели, м;

$a = H \text{grad} H$, $A^2/\text{м}^3$;

χ и $\bar{\chi}_c$ – удельные магнитные восприимчивости соответственно частиц и среды в зоне разделения, кг^{-1} ;

$\gamma_{исх}(\chi)$ – функция распределения выходов частиц в исходном продукте в зависимости от удельной магнитной восприимчивости, д.е.

Исходя из формулы (3.76) для прогнозирования технологических показателей обогащения О. Н. Тихонов предлагает следующие формулы [103]:

$$\begin{cases} \bar{\gamma}_{кон} = \int_0^{\infty} \varepsilon_m(\chi) \gamma_{исх}(\chi) d\chi; \\ \bar{\gamma}_{хв} = 1 - \bar{\gamma}_{кон}. \end{cases} \quad (3.77)$$

$$\begin{cases} \bar{\beta}_{\text{кон}} = \frac{1}{\gamma_{\text{кон}}} \int_0^{\infty} \beta_{\text{исх}}(\chi) \varepsilon_m(\chi) \gamma_{\text{исх}}(\chi) d\chi; \\ \bar{\beta}_{\text{хв}} = \frac{1}{\gamma_{\text{хв}}} \int_0^{\infty} \beta_{\text{исх}}(\chi) [1 - \varepsilon_m(\chi)] \gamma_{\text{исх}}(\chi) d\chi. \end{cases} \quad (3.78)$$

Формула (3.76) является сепарационной характеристикой, отражающей вероятность извлечения сепаратором магнитных фракций исходного продукта в концентрат.

При разработке конкретной технологии обогащения удобнее пользоваться сепарационными характеристиками отражающими содержание полезного компонента в продуктах обогащения.

Для определения сепарационной характеристики $\varepsilon(\beta)$ сепараторов ВГСНПМП на руде известного состава $\gamma_{\text{исх}}(\beta)$ предлагается следующая формула:

$$\varepsilon(\beta) = 0,5 + 1/(k(2\pi)^{0,5}) \int_0^{72,4} \exp((- (\beta - \beta_p)^2) / 2k^2) \quad (3.79)$$

где $\beta_p = f(H_{\text{gradH}}, \omega)$ - магнитная восприимчивость в точке разделения, ед;

ω - частота магнитного поля, с^{-1} ;

$k = f(A, H)$ - коэффициент, зависящий от характера среды конкретного сепаратора и напряженности магнитного поля в рабочем зазоре, ед

3.4 Моделирование процесса ВГСНПМП

Как следует из вышеизложенного, моделирование показателей процесса ВГСНПМП должно производиться применительно к конкретному сепаратору, т.к. результаты обогащения зависят от конструктивных параметров сепаратора: геометрических размеров рабочей зоны, размера и расположения элементов матрицы и конфигурация сепарационной системы. Следовательно, модель процесса ВГСНПМП (рисунок 3.6) должна включать

моделирование конструктивных параметров рабочей зоны сепаратора ВГСНПП и моделирование технологических (режимных) параметров.

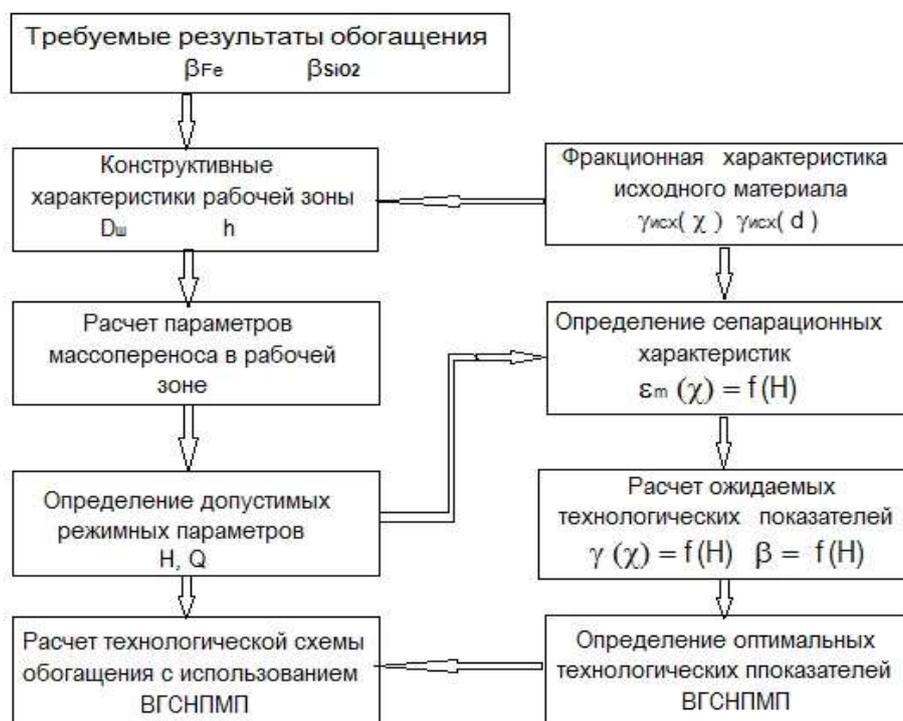


Рисунок 3.6. Принципиальная схема моделирования конструктивных и технологических параметров процесса разделения магнитных минералов в сепараторе ВГСНПП.

Алгоритм моделирования конструктивных параметров рабочей зоны сепаратора ВГСНПП включает:

- выбор формы ферромагнитных элементов;
- определение по заданной характеристике материала и требуемой производительности максимально возможного среднего уровня магнитных и соответствующих ему гидромеханических сил F_m и $F_{ГМ}$;
- определение размеров полиградиентной среды и средней скорости движения пульпы в рабочем канале;
- определение радиуса захвата в межшаровом канале среды исходя из условия $F_m(r) = F_{ГМ}(r)$;

- определение по вычисленным геометрическим параметрам высокоградиентной среды и радиусу захвата вероятности захвата частиц магнитного минерала;

- нахождение числа зон (n) сепарации, необходимых для достижения заданного извлечения, и общей длины рабочего пространства сепаратора;

- определение объема зоны захвата $V_3 = f(r_3)$ и распределения извлекаемого материала в рабочем пространстве сепаратора, а так же удельной нагрузки на единицу массы шаров и производительности сепаратора.

Алгоритм моделирования технологических (режимных) параметров, обеспечивающих оптимальный режим эксплуатации сепаратора ВГСНПМП, включает:

- расчет вероятных сепарационных характеристик сепаратора β и ожидаемых результатов обогащения (γ, β, ϵ);

- определение оптимальной напряженности внешнего магнитного поля $H_{\text{опт}}$;

- определение скорости движения пульпы через высокоградиентную матрицу;

- определение оптимальной плотности пульпы ρ_p (содержание твердого в пульпе T);

Для моделирования выходных параметров ВГСНПМП применительно к конкретному материалу необходимы данные о распределении физических свойств разделяемого материала (магнитной восприимчивости, плотности, размеров зерен, содержания полезных компонентов), полученные в результате проведения магнитного и фракционного анализов исходного питания сепаратора.

Из материалов, приведенных в гл. 3 и блок-схемы (рисунок 3.4) следует, что предлагаемая математическая модель процесса ВГСНППМ разработана на основе законов электродинамики и гидромеханики с учетом влияния магнитной флокуляции.

Применение данной математической модели позволяет выбрать оптимальные технологические показатели обогащения и оптимальный технологический режим процесса.

Расчеты, проведенные с использованием данной математической модели (глава 4), позволили создать конструкцию непрерывно действующего сепаратора ВГСНППМ.

Глава 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ИСПЫТАНИЯ СЕПАРАТОРА ВГСНППМ

Для определения основных конструктивных параметров экспериментального образца сепаратора ВГСНППМ, позволяющего при доводке рядового магнетитового концентрата получить суперконцентрат, содержащий более 69% $Fe_{\text{общ}}$ при производительности по исходному питанию не менее 10 кг/ч, использовалась представленная в главе 3 модель процесса ВГСНППМ.

Экспериментальная проверка конструктивных и режимных параметров сепаратора ВГСНППМ проводилась на концентрате МГОКа.

4.1 Характеристика исходного материала

В качестве исходного материала был взят концентрат ОК-2 МГОКа. По данным лаборатории МГОКа концентрат ОК-2 имеет массовую долю железа общего - 65,2%, содержание класса минус 0,044мм - 82,6% и удельную поверхность 1456см²/г. Выявлено, что зерна имеют угловато-изометрическую, слегка вытянутую, реже округлую форму. Очертания зерен

в большинстве своем ровные или слегка изогнутые. В концентрате ОК-2 отмечено содержание сростков размером до 0,096мм. Раскрытие рудной фазы составило 95,5%, нерудной – 45,1%. Свободных рудных зерен – 87,7%. Богатых сростков с содержанием рудного 90-50% – 4,4%. Бедных сростков с содержанием рудного 50-25% – 1,4%. Вкрапленников с содержанием рудного 25-5% – 2,8%. Свободных нерудных зерен – 3,7%.

Несложный подсчет показывает, что удаление только нерудных зерен позволяет повысить качество концентрата до 70,9% Fe, а удаление еще и всех вкрапленников может дать содержание Fe 71,2%.

Ситовый анализ концентрата ОК-2 представлен в табл. 4.1. Он показывает, что наиболее бедным по содержанию железа является класс - 0,01, что подтверждает изначальное предположение о захвате в концентрат переизмельченного кварца в результате его пьезозарядки. Сростки распределены по всем классам практически равномерно, что затрудняет их выделение какими-нибудь механическими методами.

Таблица 4.1. - Ситовый анализ концентрата ОК-2 МГОКа

Класс, мм	Выход, %	Содержание Fe общ, %	Извлечение Fe общ %
-0,1+0,074	3	66,10	3,09
-0,074+0,05	6	67,10	6,28
-0,05+0,03	65	67,70	68,59
-0,03+0,01	19	67,30	19,93
-0,01	7	19,30	2,11
Всего	100	65,13	100,00

4.2 Разработка конструктивных параметров сепаратора

4.2.1 Выбор формы и размеров элементов высокоградиентной матрицы сепаратора.

При относительно небольшой напряженности магнитного поля получить необходимый для извлечения уровень магнитной силы можно только при применении полиградиентной среды. Практически все типы высокоградиентных матриц обеспечивают необходимый градиент магнитного поля [119], поэтому выбирать их форму необходимо исходя из механических свойств и влияния на режим протекания жидкости. Большое значение имеет возможность её регенерации. Полиградиентная среда может представлять собой металлическую вату, набор рифленых пластин, расположенных параллельно, набор параллельных металлических стержней или объем, заполненный металлическими шарами. С одной стороны, необходимо увеличивать эффективную площадь осадительной поверхности, а с другой - максимально приближать радиус кривизны элементов осадительной поверхности к размерам частиц извлекаемого материала, в данном случае 0,04-0,05мм, так как по результатам исследований, проведенных В.В. Кармазиным, такие размеры осадительной поверхности наиболее эффективны. Этим требованиям наиболее соответствует металлическая вата из проволоки толщиной 0,1 мм, применяющаяся в полиградиентных сепараторах (сепараторы фирмы Сала и т.д.) [15], однако она имеет низкую скорость фильтрации, быстро засоряется немагнитными включениями и солями жесткости. Проведенные опыты показывают, что даже при небольших значениях напряженности магнитного поля металлическая вата обеспечивает достаточно хорошее извлечение всех сильномагнитных частиц из пульпы [120]. С другой стороны, сложная микропористая структура металлической ваты не способствует свободному прохождению пульпы, и промывка её от осевших частиц магнетита в промышленных условиях осуществляется под большим напором воды, что приводит к определенным затратам.

Наборы пластин или металлических стержней лишены этого недостатка. Они формируют достаточно однородную картину поля, легко регенерируются (промываются водой) вследствие достаточно широких зазоров между элементами, однако имеют недостаточно большую осадительную поверхность, и, следовательно, удельную ёмкость по извлекаемому материалу. К недостаткам можно отнести то, что они относятся к бесконтактному типу полиградиентных сред, в которых магнитное сопротивление рабочего пространства повышено, и, следовательно, требуется значительно повысить напряженность магнитного поля для сохранения извлекающей силы. Неподвижные элементы полиградиентных сепараторов в виде стержней так же подвержены постепенному засорению и зарастанию карбонатными осадками [55].

Компромиссным вариантом является слой металлических шаров небольшого диаметра, который с одной стороны, формирует внутри себя одинаковые ячейки с достаточно высокими градиентами поля. С другой стороны, поры между шарами достаточно велики для эффективного прохождения пульпы через рабочую зону сепаратора. После снятия магнитного поля создаются условия для отделения шаров от налипшего магнетита и других включений. Например, шары можно полностью очистить, применив мокрое грохочение.

В силу вышеуказанных причин выбор был остановлен на полиградиентной матрице из стальных шаров. Шары из стали ШХ15 создают достаточно однородную повторяющуюся структуру, имеющую достаточно высокие градиенты в точках соприкосновения шаров.

Для определения наиболее эффективного диапазона диаметра шаров полиградиентной среды проводились эксперименты на стендовом сепараторе ВГСНПМП периодического действия.

Стендовый сепаратор имеет простейшую кассетную конструкцию.

Кассета, заполненная стальными шарами диаметром 8 мм, имеет размеры 60x52x96 мм и устройства для загрузки и выгрузки пульпы.

Для создания постоянного и переменного магнитного поля используются электромагниты. Сердечники электромагнитов были изготовлены из пластин трансформаторной стали для предотвращения появления токов Фуко. Физические размеры сердечника определялись исходя из размеров сепаратора. Количество витков и сила тока в обмотках электромагнитов рассчитывались по стандартной методике [83].

Рабочий цикл сепаратора включает следующие фазы:

- включение магнитного поля,
- подача пульпы,
- промывка магнитного продукта,
- удаление воды из рабочей зоны,
- снятие магнитного поля,
- разгрузка магнитного продукта,
- регенерация полиградиентной среды.

Зависимости содержания магнетита в концентрате и извлечения магнетита в концентрат одним слоем полиградиентной среды приведены на рисунке 4.1.

Зависимость содержания и извлечения магнетита от диаметра шаров

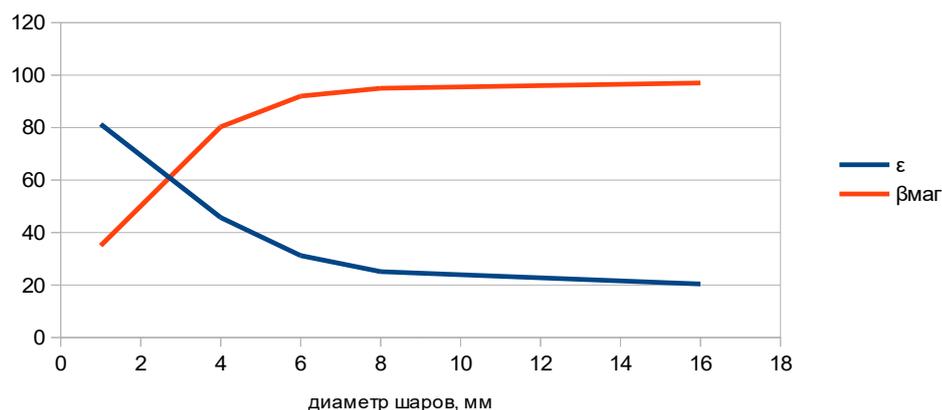


Рисунок.4.1 Зависимость содержания магнетита в концентрате β_{Fe} и извлечения магнетита в концентрат ϵ от диаметра шаров полиградиентной среды.

Из графика следует, что оптимальным является диаметр шаров 6 –8 мм. Уменьшение диаметра шаров приводит к повышению извлечения магнитной

фракции, но снижает содержание магнетита в концентрате, а увеличение диаметра шаров выше 8 мм, незначительно повышает качество концентрата и снижает извлечение.

При диаметре шаров 6 – 8 мм межшаровое пространство достаточно легко пропускает пульпу, при этом, благодаря сильно разветвленной структуре каналов, практически исключается прохождение части потока мимо зон высокого градиента магнитного поля. Такая среда достаточно хорошо поддается регенерации на грохоте.

Для проектируемого сепаратора в качестве полиградиентной среды были приняты стальные шары диаметром 8 мм.

Для подтверждения эффекта повышения селективности высокоградиентной сепарации в переменном магнитном поле проводились эксперименты на кассетном сепараторе периодического действия.

Условия эксперимента: $H=12$ кА/м, $t/ж = 20\%$.

Обобщенные результаты экспериментов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 Содержание железа общего в концентратах, полученных в результате высокоградиентной сепарации в переменном и постоянном магнитном поле.

Число опытов (n)	Содержание Fe _{общ} , %	
	Переменное поле	Постоянное поле
1	69,12	67,81
2	69,20	68,2
3	69,55	68,15
4	69,33	67,89
5	69,25	67,78
Среднее значение, %	69,29	67,97
Дисперсия, %	0,027	0,038

Среднее содержание $Fe_{\text{общ}}$ в концентрате полученном при сепарации в переменном магнитном поле составило $\beta_1 = 69,29\%$, а в постоянном поле - $\beta_2 = 67,97\%$. Т.е. высокоградиентная магнитная сепарация в переменном поле увеличила содержание железа в концентрате на $1,32\%$. Дисперсии в первом и втором случае соответственно составляют $s_1^2 = 0,027\%$ и $s_2^2 = 0,038\%$.

Определение значимости различия полученных средних значений производилось на основании рассмотрения статистических гипотез [88].

Была рассмотрена нулевая статистическая гипотеза о равенстве выборочных средних $H_0: \beta_1 = \beta_2$.

Для этого сначала проверялась гипотеза о равенстве дисперсий $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$.

Определялось F-отношение

$$F = s_2^2 / s_1^2 = 0,038 / 0,027 = 1,423.$$

Полученное F-отношение сравнивалось с F-критерием Фишера со степенями свободы $\nu_1 = \nu_2 = n - 1 = 4$.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение критерия Фишера для данных условий $F_{\text{кр}} = 6,39$, следовательно, $F = 1,42 < 6,39$ и гипотеза $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$, была принята с уровнем значимости $1 - \alpha = 0,95$.

Равенство дисперсий позволило применить для сравнения выборочных средних t-критерий Стьюдента:

$$t = |(\beta_1 - \beta_2) / s_{\text{ср}}| \cdot ((nm / (m+n))^{1/2}) = |(69,29 - 67,97) / 0,18| \cdot (16/8)^{1/2} = 10,4,$$

$$\text{где } s_{\text{ср}}^2 = [(n-1)s_1^2 + (m-1)s_2^2] / [n+m-2] = (4 \cdot 0,027 + 4 \cdot 0,038) / 8 = 0,0327\%,$$

Проводилась проверка гипотезы $H_0: \beta_1 = \beta_2$ при альтернативной ей гипотезе $H_1: \beta_1 > \beta_2$.

Табличное значение одностороннего t-критерия Стьюдента $t_{\text{кр}} = 2,78$ определялось при уровне значимости $0,95$ и степенями свободы $\nu = n + m - 2 = 8$ и сравнивалось с t-критерием, вычисленным по результатам эксперимента:

$$t = 10,4 > t_{\text{кр}} = 2,78 \quad (4.1)$$

следовательно, нулевая гипотеза отвергается с мерой риска 0,05 и можно утверждать, что применение переменного магнитного поля позволяет улучшить процесс полиградиентной магнитной сепарации.

4.2.2. Расчет высоты рабочей зоны сепаратора

Для сепаратора, в котором используется полиградиентная среда, состоящая из стальных шаров, высоту рабочей зоны h можно определить по формуле (4.2):

$$h = kD_{ш}, \quad (4.2)$$

где k - количество шаровых слоев определяется по формуле (4.3)

$$k = \ln(1 - \varepsilon) / \ln(1 - \varepsilon_i), \quad (4.3)$$

где ε - заданное извлечение магнетита в концентрат, д.е.;

ε_i – извлечение магнетита в одном слое полиградиентной среды, д.е.

Если процесс разделения направлен на получение суперконцентратов, то, как целевое, следует рассматривать 97% извлечение раскрытых магнетитовых зерен в концентрат.

Принимаем извлечение магнетита в одном слое шаров диаметром 8 мм $\varepsilon_i = 0,25$ (рис. 4.1).

$$k = \ln(1 - 0,97) / \ln(1 - 0,25) = 12,2 \quad (4.4)$$

Принимаем количество слоев равным 12.

Необходимая высота рабочего пространства для достижения $\varepsilon = 1$ равна $h = 12 \cdot 8 = 96$ мм.

В результате исследований выяснилось, что при увеличении высоты (длины) рабочего пространства выше расчетного, нижние шары позволяют установиться режиму течения жидкости через матрицу. Но при увеличении высоты полиградиентной среды требуется увеличивать и расход воды в зоне промывки.

4.2.3. Удельная емкость шаровой матрицы.

Длительность рабочего цикла, после которого необходима регенерация матрицы, определяется ее удельной ёмкостью.

Удельная ёмкость полиградиентной матрицы определяется особенностями её геометрического строения и напряженностью приложенного к ней магнитного поля. В случае шаровой матрицы магнитный материал накапливается вокруг точки контакта двух соседних шаров в виде кольцевой фигуры, напоминающей тор (рисунок 4.2).

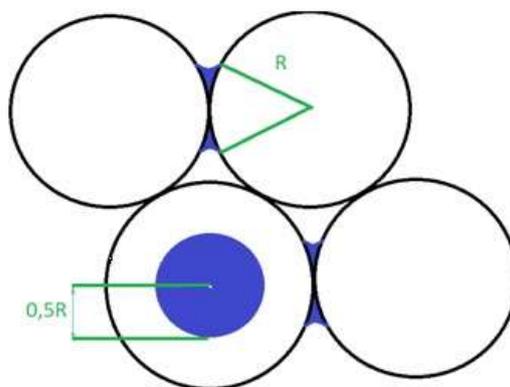


Рисунок 4.2 - Область накопления концентрата в слое шаров.

Поперечное сечение тора представляет собой усеченный треугольник с вогнутыми сторонами, две из которых являются поверхностями соседних шаров, а третья повторяет силовые линии магнитного поля, пронизывающего эти шары.

Внутренний диаметр тора ограничивается зоной контакта двух шаров, где сепарация отсутствует, так как здесь напряженность магнитного поля постоянна и равна напряженности насыщения для материала шаров, и, следовательно, нет градиента магнитного поля. Внешний диаметр ограничен областью $0,5R_{ш}$ (при напряженности поля 15 кА/м), где гидромеханические силы уравниваются с магнитной извлекающей силой, и сепарация так же не происходит. Объем этой фигуры (тора), если принять стороны его сечения прямыми, составляет $V_{эл} = 0,07R_{ш}^3$. Теоретически именно такой объем может накопить контакт двух соседних шаров. При повышении напряженности магнитного поля или уменьшении скорости протекания жидкости размер

тора увеличивается и при напряженности 50 кА/м полностью перекрывает канал (матрица становится непроходимой для пульпы, что подтверждается опытными данными). В нашем случае, при плотной упаковке, шар окружен 12 контактирующими с ним шарами, причем центры этих шаров образуют тетраоктаэдр (рисунок 4.3).

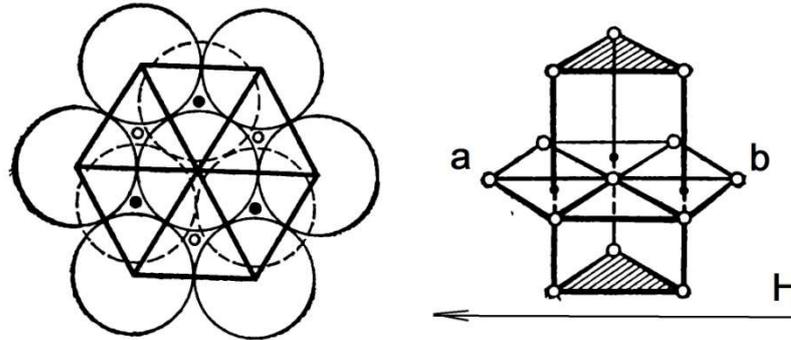


Рисунок 4.3 - Расположение окружающих шаров относительно центрального шара при плотной упаковке (тетраэдрической)

Если поле направлено, как показано на рис.4.3, то наибольшее количество концентрата будет накапливаться в точках контакта шаров а и б. В остальных точках контактов материала накопится меньше, так как плоскость контакта не будет перпендикулярна силовым линиям магнитного поля, и, следовательно, извлекающая магнитная сила будет значительно меньше. Её можно определить как $F_i = F \cos \beta$, где β - угол между силовыми магнитными линиями и плоскостью контакта двух соседних шаров. Поскольку плоскость контакта между верхним и нижним шарами практически параллельна линиям магнитного поля, сепарации в этих точках не происходит. В горизонтальной плоскости один шар окружен еще шестью такими же, поэтому угол между их центрами равен 60° . Исходя из этого, можно рассчитать, сколько элементарных объёмов $V_{эл}$ может накопить матрица, содержащая k слоёв, имеющих n шаров, расположенных в m рядов:

$$V_k = ((n - 1) + ((n - 1) + (2n - 1)(m - 1)\cos 60^\circ))kV_{эл} \quad (4.5)$$

$V_{эл}$ зависит от напряженности магнитного поля, так как при уменьшении напряженности внешнего магнитного поля уменьшается и зона насыщения, и зона сепарации:

$$V_{эл} = V_{max}kH \quad (4.6)$$

где: V_{max} - максимальный объём концентрата, накапливаемого контактом между шарами. Опытным путем установлено, что $k=0,02$ м/кА.

Кассета лабораторного сепаратора имеет размеры 52x60x96мм, в ней помещается $n=7$ шаров в $m=6$ рядов и $k=12$ слоёв. Шары имеют диаметр 8мм. Подставив эти значения в формулу (4.7) получим объём концентрата, задерживаемого матрицей в рабочем режиме ($H=15$ кА/м):

$$V_k = ((7-1)+((7-1)+(49-1)(6-1)0,5))12 \times 0,07 \times 8/2 = 2,69 \text{ см}^3.$$

Отсюда несложно найти массу магнетита:

$$m_{магн} = V_k \rho_{магн} = 2,69 \times 5 = 13,45 \text{ г.} \quad (4.7)$$

Масса шаровой матрицы равна:

$$M_{ш} = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{ст} n_{ш} = \frac{4 \times 3,14 \times 0,4^3 \times 5 \times 504}{3} = 1053 \text{ г.} \quad (4.8)$$

Нетрудно посчитать, что удельная емкость шаровой матрицы $P_{уд}$ равна 1,2% от массы шаровой загрузки за один рабочий цикл.

4.2.4. Расчет параметров массопереноса в рабочей зоне

Межшаровый канал, по которому протекает обогащаемый материал, образован контактирующими шарами и представляет собой достаточно сложную конструкцию, изогнутую в пространстве и имеющую практически постоянную площадь сечения, образованную стенками трёх контактирующих шаров.

Известны девять видов укладки частиц в слое, при которых координатное число (число точек контакта на один шар) s изменяется от 4 до 12. При этом коэффициент пористости среды m (отношение объема пористого пространства к общему объему среды) уменьшается соответственно от 0,777 до 0,26. Схемы укладки шаров с координационным

числом 6 и 12 приведены на рисунке 4.4.

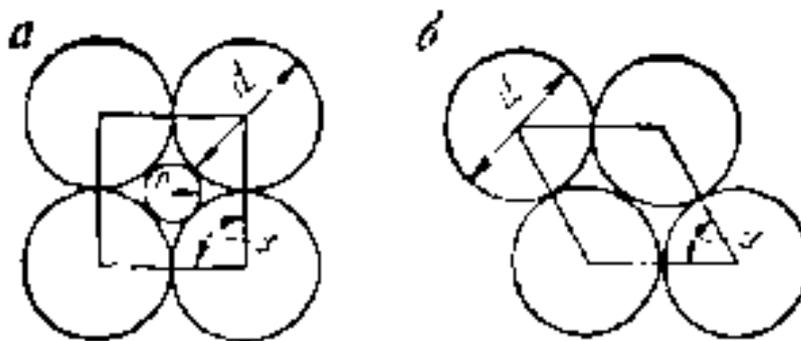


Рисунок 4.4 -Виды плотнейшей укладки шаров: *a* – кубическая $\alpha = 90^\circ$; *б* – гексагональная $\alpha = 60^\circ$.

К. Роджерсом было впервые доказано, что наиболее плотной упаковкой шаров является тетраэдрическая, с координационным числом 12. Также им было доказано, что никакая упаковка шаров не может иметь плотность большую чем $\sim 0,7796$, причем плотность не зависит от размера шаров [87].

Коэффициент m можно определить на основе физических свойств материала

$$m = (1 - \delta_0/\rho), \quad (4.19)$$

где δ_0 , ρ — соответственно насыпная и средняя плотность материала, кг/м³.

Коэффициент пористости, как видно из формулы, не зависит от диаметра шара. Аналогично не зависит от диаметра шара и коэффициент просвета n (соотношение площади просвета между шарами к общей площади сечения среды):

$$n = 1 - \pi/(4 \sin\Theta) \quad (4.20)$$

Значения этих параметров для основных видов укладки приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Параметры укладки шаров.

Вид укладки	c	θ , градус	m	n
Кубическая	6	90	0,476	0,215
Ромбическая	8	—	0,394	—
Биромбическая	10	—	0,302	-
Тетраэдрическая	12	60	0,259	0,093

Для шаровой матрицы сепаратора ВГСНППМ, при вибрационном уплотнении, которое имеет место при воздействии переменного поля, наиболее вероятна тетраэдрическая упаковка шаров (рисунке 4.5) [94].

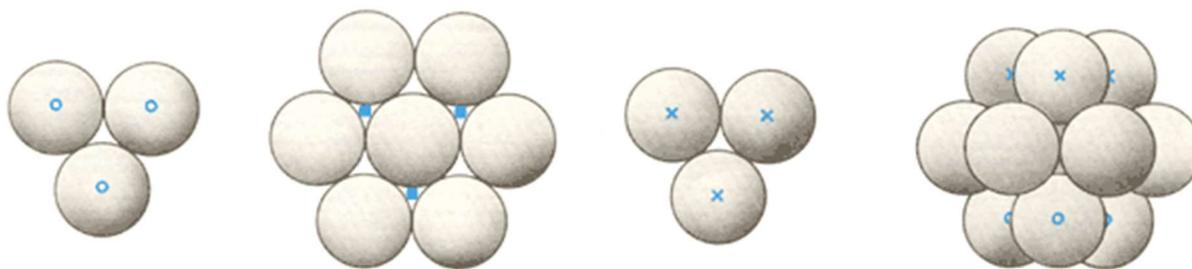


Рисунок 4.5 –Тетраэдрическая упаковка шаров. Слева направо: нижний, средний и верхний слой, общий вид.

Радиус окружности, вписанной между четырьмя соприкасающимися шарами (рис.4.2), $r_1 = 0,41 R_{ш}$ (где $R_{ш}$ — радиус шара), а радиус окружности, вписанной между соприкасающимися шарами $r_2 = 0,155 R_{ш}$.

Это подтверждается экспериментами по сепарации в слое шаров. Практически частицы, диаметр которых $d \geq 0,15$, забивают полиградиентную среду.

Для шаров диаметром 8 мм, $r = 0,155 \cdot 8/2 = 0,62$ мм. Следовательно, материал крупностью – 0,044мм не будет забивать полиградиентную среду, состоящую из шаров диаметром 8 мм.

В случае тетраэдрической упаковки шаров (рисунок 4.6) стенки соседствующих трех шаров ограничивают пространство, в сечении представляющее собой равносторонний треугольник с криволинейными сторонами. Так как центральный угол равен 60° , $L=R$. Площадь сечения

канала равна разнице между площадью треугольника, образованного точками контакта шаров и тремя частями площади окружности, ограниченной хордой, образованной теми же точками контактов.

Исходя из пористости можно найти расход жидкости по закону Дарси.

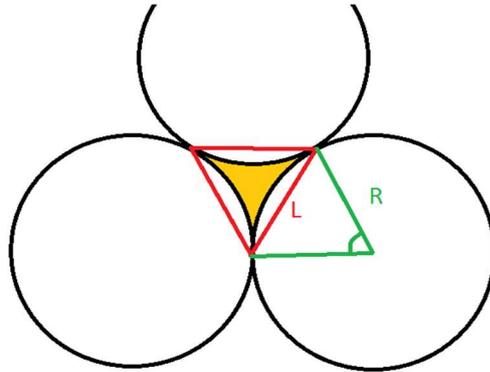


Рисунок 4.6 - Форма межшарового канала.

Фильтрационный расход находим по формуле:

$$Q = \omega KI, \quad (4.21)$$

где: Q – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω – площадь поперечного сечения кассеты, м^2 ;

K – коэффициент фильтрации, $\text{м}^3/\text{с}$;

I - гидравлический напор.

Так как движение жидкости через слой шаров имеет переходный или турбулентный характер, скорость фильтрации можно найти по эмпирической формуле [78]:

$$W = KI^z \quad (4.22),$$

где: W – скорость фильтрации;

$z < 1$ – коэффициент.

Гидравлический напор определяется конструкцией сепаратора, как и площадь поперечного сечения кассеты. Определяющим скоростью протекания жидкости параметром является коэффициент фильтрации K , который имеет размерность скорости и представляет собой скорость фильтрации при гидравлическом напоре, равном единице. Коэффициент K можно найти по формуле:

$$K = cd_{ш}^2 g/\nu \quad (4.23)$$

где: ν - кинематическая вязкость жидкости, m^{-1} ;

c – безразмерный коэффициент, зависящий от пористости шаровой загрузки.

Для шаров, диаметр которых превышает 5-7мм, скорость протекания жидкости можно рассчитать по формуле Краснопольского для турбулентного фильтрования:

$$V = k_t \sqrt{2gH_{ж}} \quad (4.24)$$

где: k_t - коэффициент Краснопольского;

$H_{ж}$ - напор жидкости.

Реально существующий режим движения жидкости в межшаровом канале можно представить как комплексный, имеющий в центре канала турбулентную зону, и ламинарный слой возле стенок канала. Скорость жидкости и соответственно уровень диссипативных сил меняются при перемещении от стенки канала к его центру. Скорость протекания жидкости в комплексном режиме можно оценить по формуле:

$$V = \sqrt{\frac{\sigma_{ж}}{\delta}} [5,75lg \frac{x}{\nu} \sqrt{\frac{\sigma_{ж}}{\delta}} + 5,5] \quad (4.25),$$

где: $\sigma_{ж}$ - напряжение турбулентного трения, c/m^3 ;

δ - плотность пульпы, m^3/c ;

x - расстояние от стенки шара по нормали к поверхности, м;

Аналогичным образом, но в обратной пропорциональности меняется извлекающая магнитная сила. Таким образом, центр канала практически всегда проходим для пульпы, что объясняет протекание пульпы через шаровую матрицу при напряжениях магнитного поля выше уровня флокуляции. Скорость протекания жидкости необходимо поддерживать не выше 5 см/с, т.к. при больших скоростях наблюдается распад струи жидкости в межшаровом канале на вихревые потоки, что отрицательно сказывается на результатах сепарации.

4.3 Определение режимных параметров сепарации

4.3.1. Определение оптимальной напряженности магнитного поля в рабочем зазоре.

Как было показано в главе 3, основной извлекающей силой в проектируемом сепараторе является градиентная магнитная сила. При извлечении сильномагнитных минералов магнитное поле может развивать ускорение $50g$ и более, что очень важно для сильно измельченных частиц, у которых диссипативные силы очень велики. В зоне осаждения напряженность магнитного поля и его градиент должны достигать значений, необходимых для обеспечения перевеса магнитной силы над диссипативными силами.

Напряженность магнитного поля должна обеспечивать требуемый градиент магнитного поля, но она не должна превышать порога сплошной флокуляции пульпы, чтобы не лишать подвижности её составляющие.

Известно, что флокуляция суспензии приобретает лавинообразный характер при напряженности выше 20кА/м [29]. Следовательно, в зонах транспортировки и в поровых каналах полиградиентной матрицы напряженность магнитного поля не должна превышать 20кА/м .

В полиградиентной среде линии магнитного поля концентрируются в местах контакта шаров и напряженность поля и его градиент в этих областях выше, а в точках равноудаленных от центров шаров практически равна нулю. Изменение напряженности внешнего магнитного поля приводит к перераспределению областей транспортировки и областей захвата материала: чем больше напряженность внешнего поля, тем шире зона захвата и уже каналы транспортировки. Условия для эффективной сепарации ($H < 20\text{ кА/м}$ и $H_{\text{grad}} > 10^4$) сохраняются в центрах межшаровых каналов матрицы и при напряженностях внешнего магнитного поля, значительно превышающих порог сплошной магнитной флокуляции.

Для того чтобы определить градиент магнитного поля в системе шаров, рассмотрим элементарную ячейку, образованную 3-мя контактирующими

шарами. Как было показано В.В. Кармазиным [44], напряженность поля в точке контакта постоянна и не превышает напряженность насыщения $H_H=160$ кА/м. В этой зоне градиент напряженности и, следовательно, магнитная сила равны нулю. Из-за малого размера этой зоны она практически не сказывается отрицательно на результатах сепарации. В остальной части межшарового пространства действует магнитная сила:

$$F_{\text{маг}} = \mu_0 k \frac{B_{\text{смет}}^2 V}{8\pi R_{\text{ш}}} e^{-2kr^n/R_{\text{ш}}}, \quad (4.26)$$

где: r – расстояние от границы точки насыщения до интересующей нас точки, м;

V – объём частицы, м³;

μ_0 - магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

$k = (2,5 - 3)$ и $n=(1,1-1,6)$ коэффициенты, учитывающие влияние соседних шаров.

$R_{\text{ш}}$ – радиус шара, м; $R_{\text{ш}} = 0,008$ м;

V – скорость фильтрации, м/с; $V = 0,02$ м/с;

$B_{\text{смет}}$ – магнитная индукция, Тл; $B_{\text{смет}} = \mu_0(1+\kappa)H = \mu_0\mu H = \mu_{\text{абс}}H$.

κ – объемная магнитная восприимчивость магнетита, б/р;

$\mu_{\text{абс}}$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; $\mu_{\text{абс}} = B/H$.

$R_{\text{впис}} = R_{\text{ш}}/(2 \cdot 3^{1/3}) = 0,289 R_{\text{ш}} = 0,289 \cdot 0,008 = 2,3 \cdot 10^{-3}$ м.

Средний объём частицы $V = 4\pi (22 \cdot 10^{-6})^3/3 = 4,46 \cdot 10^{-14}$ м³

Для эффективного протекания процесса сепарации необходимо, чтобы выполнялось неравенство:

$$F_{\text{маг}} > F_{\text{гм}} \quad (4.27)$$

На рисунках 4.7 и 4.8 представленные эпюры $F_{\text{гм}}$ и $F_{\text{маг}}$, полученные расчетным путем в зависимости от соотношения $x/R_{\text{ш}}$, позволяющего определить положение частицы в межшаровом канале (x - расстояние от частицы до стенки шара). Видно, что в центре канала гидромеханические силы всегда превалируют над магнитной извлекающей силой.

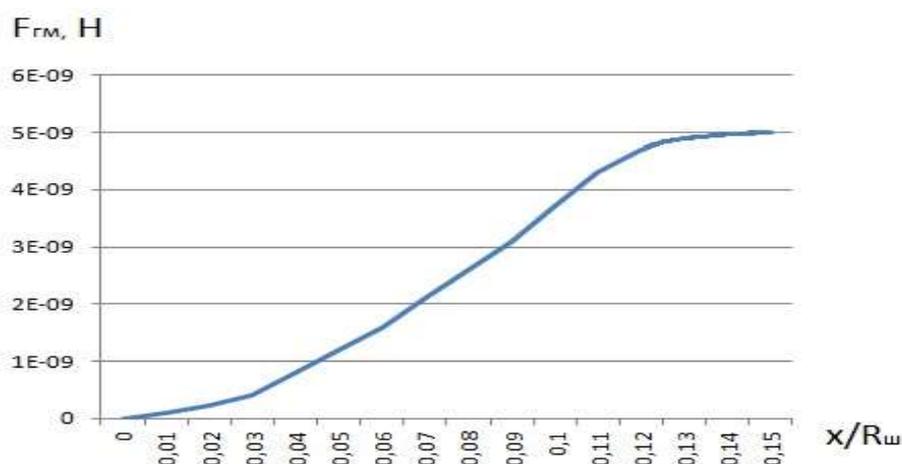


Рисунок 4.7 - Эпюра $F_{ГМ}$ в межшаровом канале.

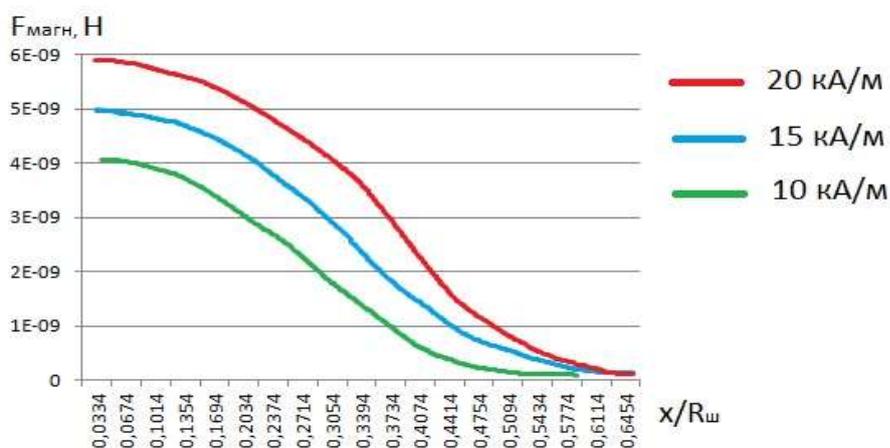


Рисунок 4.8 - Эпюра магнитной силы в межшаровом канале

Из приведенных расчетных зависимостей видно, что в зоне сепарации, находящейся в пределах от 0 до $0,5R_{ш}$ напряженность поля 15 кА/м позволяет достичь необходимого соотношения магнитной и гидромеханической сил.

4.3.2 Определение оптимального содержания твердого в питании

Содержание твердого в питании сепаратора определяет вязкость пульпы и, соответственно, скорость прохождения пульпы через осадительную матрицу сепаратора.

Гидромеханические силы, оказывающие сопротивление движению пульпы, при крупности частиц <50 мкм, подчиняются закону Стокса:

$$F_{ГМ} = 3\pi\mu d v, \quad (4.27)$$

где: μ - вязкость пульпы, Па с, (Н с/м^2);

d – диаметр частицы, м;

v - линейная скорость пульпы, м/с.

В реальных условиях скорость движения жидкости достаточно высокая (0,02-0,20 м/с), что приводит к развитию вихревых ускорений из-за сложной конфигурации поверхности, поэтому для расчета скорости можно применить формулу Краснопольского для турбулентной фильтрации:

$$V = K_T \sqrt{2gH} \quad (4.28)$$

где: K_T - коэффициент Краснопольского,

H - напор жидкости, Па (Н/м^2).

Выразив μ из предыдущих двух формул, получим:

$$\mu = \frac{F_{\text{ГМ}}}{3\pi d K_T \sqrt{2gH}} = \frac{F_{\text{ГМ}}}{3\pi d V} \quad (4.29)$$

Опытным путем установлено, что с повышением относительной скорости движения пульпы через слой шаров извлечение магнитной фракции ухудшается. График зависимости извлечения магнитной фракции от скорости движения пульпы через слой шаров показан на рисунке 4.9.

Оптимальной является скорость пульпы менее 4см/с.

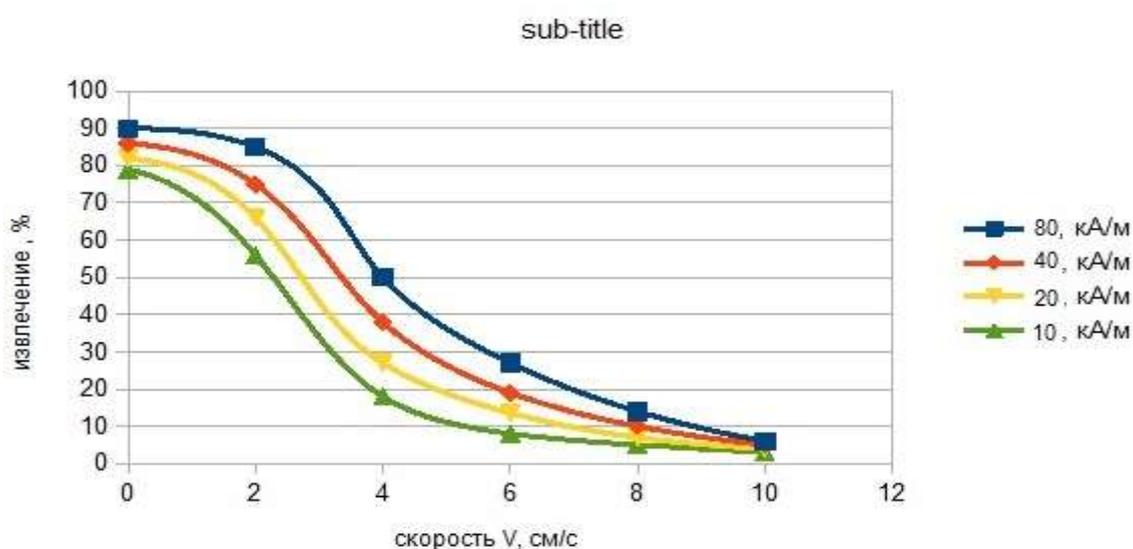


Рисунок 4.9 - Влияние относительной скорости движения пульпы через слой шаров на извлечение магнитной фракции.

Для успешного протекания процесса сепарации необходимо, чтобы извлекающая сила превалировала над силой сопротивления, следовательно, мы можем оценить величину $F_{ГМ}$ исходя из того, что для успешного протекания процесса должно выполняться неравенство:

$$F_{ГМ} \ll F_{магн} \quad (4.30)$$

$$F_{магн} = \chi m H grad H = 8 * 10^4 * \left(\frac{4}{3} \pi (22 * 10^{-6}) * 10^4 * 10^3 = 1,6 * 10^{-6} \right), Н$$

Мы можем вычислить предельную вязкость пульпы, принимая скорость течения равной 2 см/с:

$$\mu = \frac{F_{ГМ}}{3\pi d K_T \sqrt{2gH}} = \frac{1,6 * 10^{-6}}{3\pi 44 * 10^{-6} * 2 * 10^{-2}} = 0,2 \text{ (Па*с)}$$

Содержание твердого в питании вычислим используя формулу Эйнштейна

$$\mu = \mu_{ж} (1 + 2,5 \Phi), \quad (4.31)$$

где $\mu_{ж}$ – вязкость жидкости (воды);

Φ – объемное содержание твердого, д.е.

Подставив полученное значение μ в выражение (4.25) получим:

$$\Phi = 0,2 / 2,5 = 0,08$$

Приняв плотность магнетита $\delta = 5000 \text{ кг/м}^3$, получим содержание твердого $T=0,287$.

Следовательно, содержание твердого в питании не должно превышать 28,7%.

Уменьшение содержания твердого улучшает результаты сепарации, но пропорционально снижает производительность.

4.3.3 Расчет шаровой загрузки сепаратора.

Экспериментальный сепаратор имеет карусельную конструкцию. Магнитная система состоит из двух п-образных катушек, полюса которых расположены встречно. В зазоре между катушками вращается кольцевой ротор, заполненный металлическими шарами. Зная удельную

производительность шаровой матрицы, нетрудно рассчитать производительность сепаратора. Требуемая производительность не менее 10 кг/час. Выход концентрата в процессе ВГСНПМП в оптимальном режиме равняется 30%. Следовательно, матрица сепаратора должна обеспечивать перенос не менее 3 кг концентрата. Удельная производительность шаровой матрицы равна 1,2% от массы шаровой загрузки за один рабочий цикл. Предположим, что ротор сепаратора делает 2 оборота в минуту. Тогда масса шаровой загрузки будет равна:

$$M_{\text{ш}} = \frac{M_{\text{к}}}{N_{\text{об}}P_{\text{уд}}} \quad (4.32),$$

где: $M_{\text{ш}}$ - масса шаров;

$M_{\text{к}}$ - масса концентрата;

$P_{\text{уд}}$ - удельная производительность шаровой матрицы;

$N_{\text{об}}$ – количество оборотов барабана в час.

Подставив значения переменных в формулу, получим:
 $3/(0,012 \times 60 \times 2) = 2,08$ кг.

4.4. Конструкция экспериментального сепаратора ВГСНПМП

Для обеспечения непрерывности процесса сепарации в основу сепаратора ВГСНПМП положена конструкция карусельного типа. Эскиз экспериментального сепаратора ВГСНПМП непрерывного действия показан на рис 4.10.

На основании результатов выше приведенных исследований в экспериментальном сепараторе карусельного типа в качестве полиградиентной среды применены шары из стали ШХ15 диаметром 8мм.

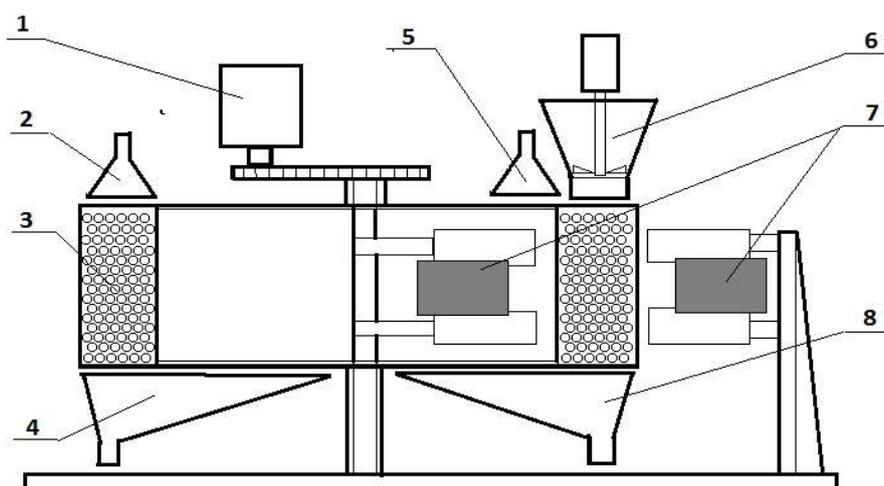


Рис.4.10. Экспериментальный сепаратор ВГСНПМП.

1 – привод барабана; 2, 5- смывная вода; 3 – шаровая матрица; 4 – сборник концентрата; 6 – загрузочное устройство; 7 – электромагниты; 8 – сборник промпродукта.

Магнитное поле создаётся встречно расположенными электромагнитами, питающимися через автотрансформатор от сети 220В 50Гц.

Вертикально расположенный барабан сепаратора имеет двойные стенки, между которыми располагаются металлические шары. Внутри барабана неподвижно закреплен один из электромагнитов. В движение барабан приводится электродвигателем, снабженным редуктором, частота оборотов регулируется в пределах от 1 до 5 об/мин. Магнитная система питается переменным током 50Гц с напряжением от 20 до 220В через автотрансформатор.

Производительность сепаратора по твердому до 12 кг/час. Кроме шаров в качестве полиградиентной среды могут быть использованы стальная вата, металлические стержни и др.

Внешний вид экспериментального сепаратора представлен на рис. 4.11.

Процесс разделения в экспериментальном сепараторе протекает следующим образом:

- в рабочий зазор сепаратора с находящейся в нем под переменным напряжением высокоградиентной матрицей подаётся питание (до 20%

твёрдого). Количество подаваемого материала определяется удельной ёмкостью матрицы по твёрдому. Режим течения смешанный.

- после заполнения находящейся под переменным напряжением матрицы подаётся вода для промывки накопившегося слоя магнетита. Режим течения турбулентный.

- затем отключается напряжение от электромагнитов и подается в турбулентном режиме смывная вода для снятия концентрата.

- после завершения процесса разделения производится отмывка полиградиентной среды от капиллярно-стыковой воды и захваченных ею частиц, которая производится большим количеством высоконапорной воды. Эффективную отмывку шаровой полиградиентной среды возможно произвести только при разрушении ее структуры в водной среде.

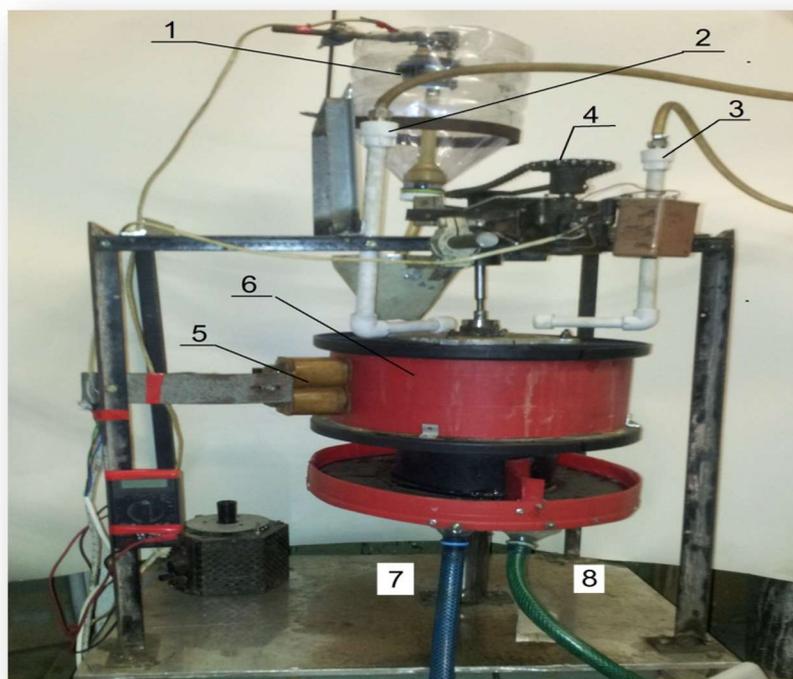


Рис. 4.11. Экспериментальный сепаратор ВГСНПМП. Обозначения: 1- устройство для подачи питания, 2,3- устройство для подачи воды, 4 –привод барабана, 5 – магнитная система, 6 – вращающийся барабан со стальными шарам, 7 – приёмник промпродукта, 8 – приёмник концентрата.

4.5. Испытания экспериментального образца сепаратора ВГСНПМП

4.5.1. Результаты обогащения концентрата МГОКа на сепараторе ВГСНПМП

Результаты испытаний экспериментального сепаратора ВГСНПМП на концентрате ОК-2 МГОКа приведены в табл.4.4.

Таблица 4.4 - Результаты сепарации концентрата ОК-2.

Напряженность кА/м	Концентрат			Хвосты		
	γ , %	β_k , %	ϵ , %	γ , %	β_x , %	ϵ , %
3	3,24	71,12	3,54	96,76	64,97	96,46
6	4,80	70,63	5,20	95,20	64,89	94,80
9	14,12	69,76	15,11	85,88	64,42	84,89
12	23,25	69,55	24,81	76,75	63,84	75,19
15	33,92	68,94	35,88	66,08	63,23	64,12
20	53,36	68,21	55,85	46,64	61,69	44,15
25	65,68	66,85	67,37	34,32	61,95	32,63
30	77,70	66,78	79,62	22,30	59,56	20,38
35	95,75	65,51	96,25	4,25	57,51	3,75
40	98,58	65,29	98,76	1,42	56,84	1,24

Зависимости показателей обогащения концентрата Михайловского ГОКа от напряженности переменного магнитного поля показаны на рис. 4.12. Из диаграммы следует, что оптимальные результаты сепарации ($\gamma=33,92$ и $\beta_k=68,94$) получены при напряженности переменного магнитного поля 15 кА/м.

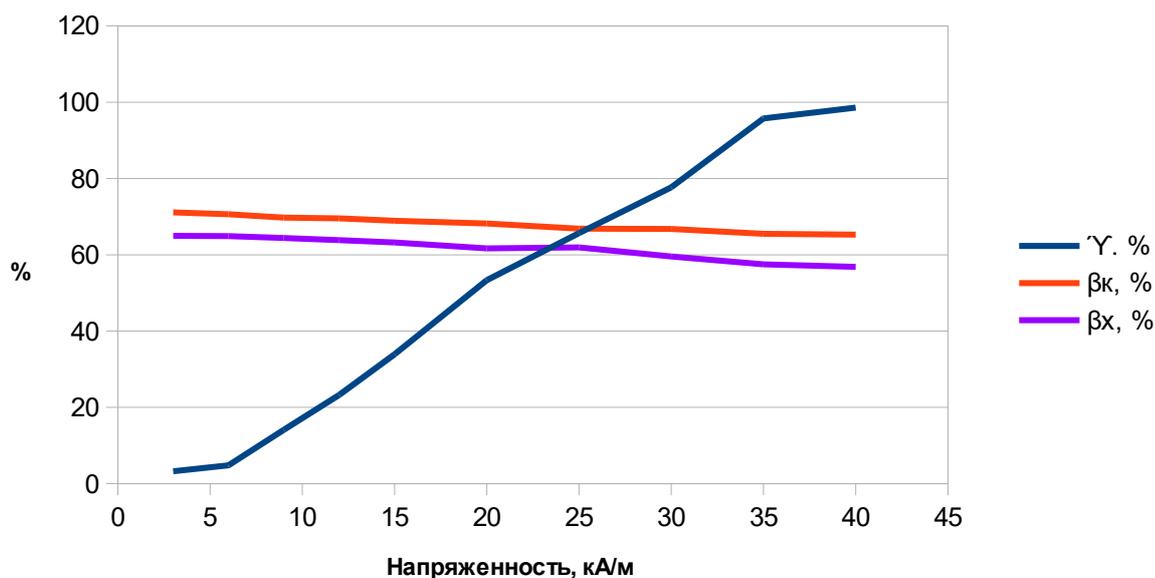


Рисунок 4.12-Результаты высокоградиентной сепарации концентрата Михайловского ГОКа на экспериментальном сепараторе ВГСНПМП.

γ_k = выход концентрата, %;

β = содержание $Fe_{общ}$ в концентрате, %;

θ = содержание $Fe_{общ}$ в хвостах.

Полученные результаты подтверждают теоретические выводы о возможности повышения селективности обогащения магнетитовых кварцитов МГОКА на основе применения сепаратора ВГСНПМП.

Для использования процесса ВГСНПМП в условиях МГОКА предлагается конструкция промышленного сепаратора барабанного типа производительностью 10 т/ч (рисунок 4.13).

Сепаратор имеет горизонтально расположенный барабан, выполненный из немагнитной нержавеющей стали 9Х18НТ. Электромагнитная система расположена внутри барабана и выполнена из трансформаторной стали.

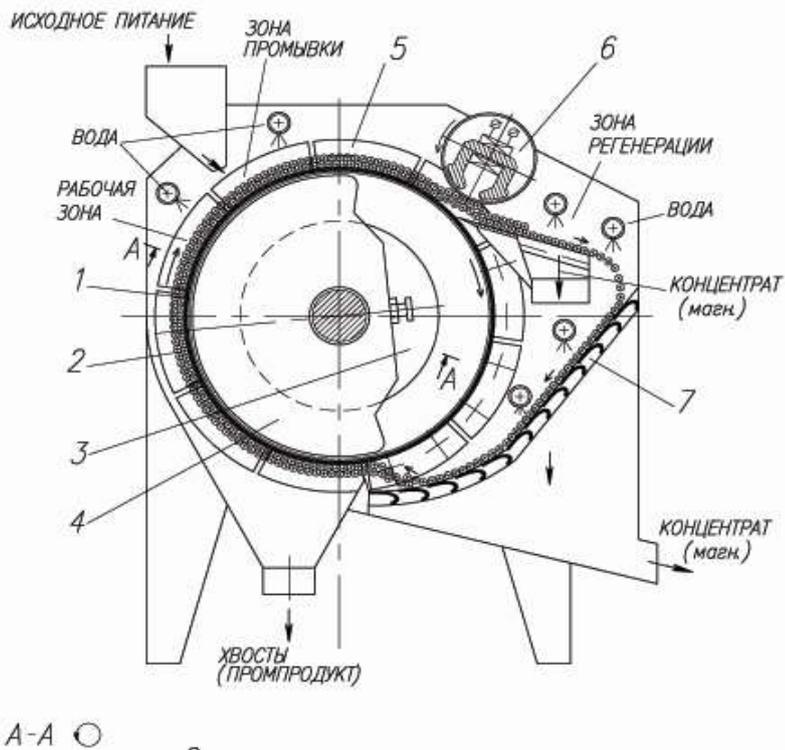


Рисунок 4.13. Барабанный сепаратор ВГСНПМП. 1- барабан сепаратора, 2 – слой шариков; 3- катушки возбуждения; 4 – магнитная система; 5 –реборды; 6-электромагнитный съёмник; 7 – шпальтовый грохот.

Краткая техническая характеристика сепаратора:

1. Тип противоточный. Назначение – сепарация сильномагнитных материалов крупностью 1,0 – 0мм.
2. Размеры барабана 1350х600мм.
3. Магнитная система осевая, электромагнитная, питающаяся переменным током. Потребление магнитной системы от сети 220В составляет 3,8А.
4. Размеры регенерационного шпальтового грохота 1000х1400мм, ширина щели 3мм.
5. Число оборотов барабана – 3-5об/мин.
6. Шаровая загрузка 400 кг шаров d=8мм.
7. Мощность привода 4,5кВт
8. Производительность по твердому 10 т/ч.

9. Габариты: 2200x1700x2100мм.

Пульпа подаётся в верхнюю часть сепаратора. Обедненный промпродукт поступает в ванну сепаратора, откуда разгружается в аккумулялирующую емкость. Шары с накопленным концентратом попадают из верхней части сепаратора в зону действия съёмника, который сбрасывает их на шпальтовый грохот, выполняющий функцию отделения концентрата и регенерации шаров. Концентрат собирается в ванну под грохотом. Очищенные шары возвращаются к барабану для повторения цикла.

4.5.2. Определение сепарационных характеристик и ожидаемых показателей обогащения сепаратора ВГСНПМП

Представленная в главе 3 модель технологического процесса ВГСНПМП разработана для определения оптимальных значений параметров обогащения.

Для моделирования сепарационных характеристик сепаратора ВГСНПМП на основе формулы (3.77), были получены эмпирические зависимости содержания железа в точке разделения β_p и коэффициента k от напряженности магнитного поля H в рабочей зоне (рисунки 4.14 и 4.15).

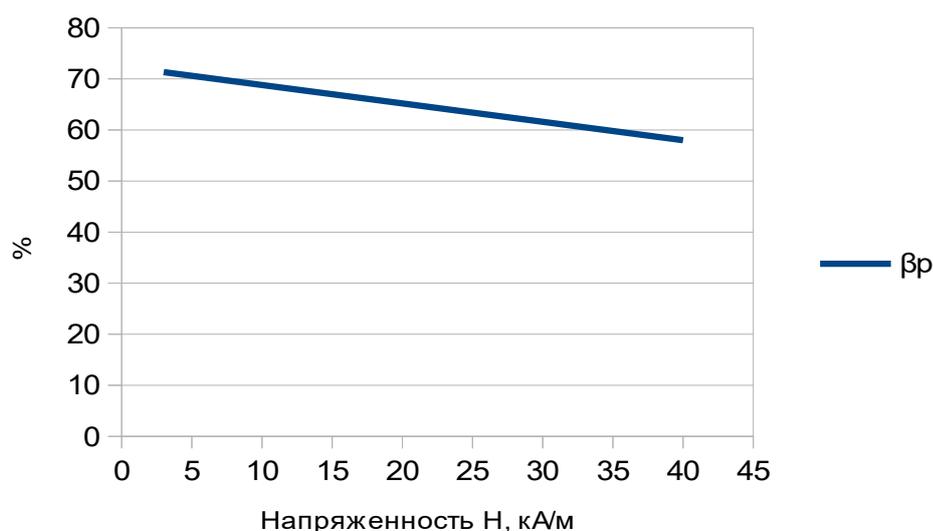


Рисунок 4.14 - Зависимость содержания общего железа β_p в точке разделения от напряженности магнитного поля H .

$$\beta_p = 100\exp(-0,28-0,048 \ln H), \%$$

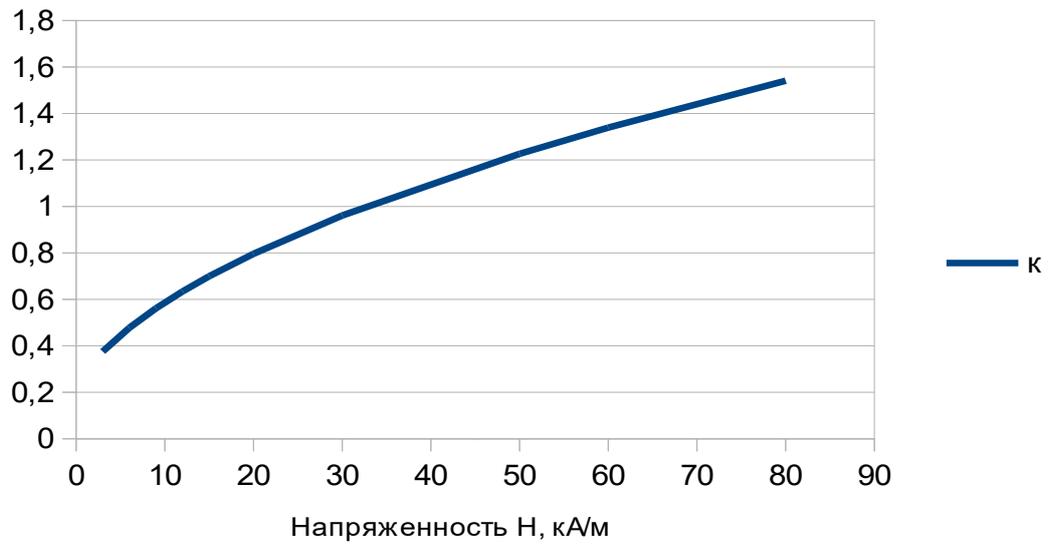


Рисунок 4.15 - Зависимость коэффициента k от напряженности магнитного поля H.

$$k = (0,029H+0,054)^{0,5}, \text{ ед.},$$

Расчетные сепарационные характеристики и параметры концентраторов для фиксированных значений H приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Расчет сепарационных характеристик сепаратора ВГСНПМП

	$\gamma_{исх}(\chi)$	$\beta_p=71,7\%$	$\gamma_{кон}$	$\beta_{кон}$	$\beta_p = 70,2\%$	$\gamma_{кон}$	$\beta_{кон}$	$\beta_p=69,1\%$	$\gamma_{кон}$	$\beta_{кон}$
$\beta_{исх}$		$k=0,375$			$k=0,477$			$k=0,561$		
%	%	$H=3 \text{ кА/м,}$ $\beta_k=71,7\%$	%	%	$H=6 \text{ кА/м,}$ $\beta_k=70,9\%$	%	%	$H=9 \text{ кА/м,}$ $\beta_k=70,1\%$	%	%
60,5	19,5	6,970E-183	1,359E-181	8,223E-180	8,676E-093	1,691E-091	1,023E-089	5,152E-054	1,004E-052	6,079E-051
61,5	5,9	4,698E-151	2,771E-150	1,704E-148	3,850E-075	2,271E-074	1,397E-072	1,035E-042	6,109E-042	3,757E-040
62,5	5,1	2,660E-122	1,356E-121	8,480E-120	2,155E-059	1,095E-058	6,869E-057	8,845E-033	4,511E-032	2,819E-030
63,5	6,8	1,269E-096	8,629E-096	5,479E-094	1,526E-045	1,038E-044	6,593E-043	3,229E-024	2,196E-023	1,394E-021
64,5	7,9	5,116E-074	4,041E-073	2,606E-071	1,376E-033	1,087E-032	7,012E-031	5,079E-017	4,012E-016	2,588E-014
65,5	9	1,752E-054	1,576E-053	1,032E-051	1,590E-023	1,431E-022	9,378E-021	3,487E-011	3,139E-010	2,056E-008
66,5	10,4	5,137E-038	5,343E-037	3,553E-035	2,390E-015	2,485E-014	1,652E-012	1,071E-006	1,114E-005	0,0007
67,5	11,1	1,307E-024	1,450E-023	9,793E-022	4,781E-009	5,307E-008	3,582E-006	0,001	0,017	1,161
68,5	10,1	2,956E-014	2,986E-013	2,045E-011	0,0001	0,001	0,092	0,119	1,210	82,888
69,5	7,8	6,271E-007	4,891E-006	0,0003	0,060	0,472	32,851	0,727	5,675	394,471
70,5	3,9	0,014	0,056	3,984	0,706	2,757	194,377	0,991	3,866	272,618
71,5	1,7	0,684	1,163	83,1595485647	0,995	1,692	121,044	0,999	1,699	121,548
72	0,8	0,964	0,771	55,5795884939	0,995	0,799	57,593	0,999	0,799	57,599
65,21	100	2,188	1,99	71,665	6,225	5,723	70,922	14,265	13,27	70,104

Продолжение таблицы 4.5

$\beta_p=67,0$ %	$\gamma_{\text{кон}}$	$\beta_{\text{кон}}$	$\beta_p=63,4$ %	$\gamma_{\text{кон}}$	$\beta_{\text{кон}}$	$\beta_p =$ 61,6%	$\gamma_{\text{кон}}$	$\beta_{\text{кон}}$	$\beta_p =$ 59,8%	$\gamma_{\text{кон}}$	$\beta_{\text{кон}}$
k=0,699			k=0,882			k=0,961			k=1,034		.
H=15 кА/м, $\beta_k=68,8$ %			H=25 кА/м, $\beta_k=67,2$ %			H=30 кА/м, $\beta_k=66,4$ %			H=35 кА/м, $\beta_k=65,5$ %		
	%	%		%	%		%	%		%	%
7,346E-021	1,432E-019	8,666E-018	0,0005	0,009	0,600	0,126	2,461	148,932	0,751	14,640	885,764
1,842E-015	1,087E-014	6,687E-013	0,015	0,092	5,686	0,458	2,705	166,392	0,949	5,604	344,683
6,167E-011	3,145E-010	1,966E-008	0,153	0,785	49,066	0,825	4,209	263,107	0,995	5,077	317,312
2,791E-007	1,898E-006	0,0001	0,545	3,706	235,375	0,975	6,636	421,417	0,9998	6,798	431,725
0,0001	0,001	0,089	0,893	7,060	455,371	0,998	7,889	508,899	0,9999	7,899	509,548
0,015	0,143	9,416	0,991	8,921	584,387	0,999	8,999	589,485	0,9999	8,999	589,499
0,237	2,467	164,116	0,999	10,397	691,446	0,999	10,399	691,599	1	10,399	691,599
0,762	8,465	571,453	0,999	11,099	749,248	0,999	11,099	749,249	1	11,1	749,25
0,984	9,938	680,798	0,999	10,099	691,849	1	10,1	691,849	1	10,1	691,85
0,999	7,798	542,005	1	7,8	542,099	1	7,8	542,1	1	7,8	542,1
0,999	3,899	274,949	1	3,9	274,95	1	3,9	274,95	1	3,9	274,95
0,999	1,699	121,549	1	1,7	121,55	1	1,7	121,55	1	1,7	121,55
1	0,8	57,6	1	0,8	57,6	1	0,8	57,6	1	0,8	57,6
37,140	35,21	68,77	68,38	66,37	67,18	80,16	78,70	66,41	95,19	94,82	65,46

Графики зависимостей расчетных сепарационных характеристик показаны на рисунке 4.16.

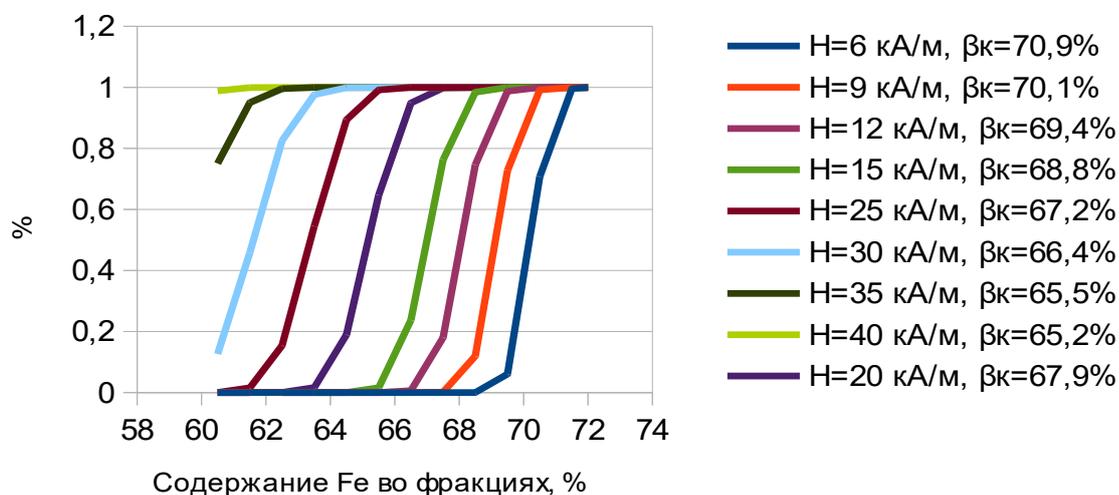


Рисунок 4.16 - Сепарационные характеристики сепаратора ВГСНПМП при различных значениях напряженности H

На рисунке видно как меняется характер кривых от близких к идеальному ($H < 12$ кА/м) до слабо выраженных ($H > 20$), что объясняется появлением флокуляции.

Для получения суперконцентратов с содержанием $\beta = 69 - 70$ % железа - оптимальный диапазон $H=10 - 15$ кА/м.

Для определения доверительного интервала качества концентрата при обогащении на сепараторе ВГСНПМП были проделаны параллельные опыты при напряженности $H = 10$ кА/м. Результаты приведены в таблице 4.6.

Доверительный интервал определяется по формуле [7]

$$X_{cp} \pm t s_x / N^{0,5},$$

где t – критерий Стьюдента,

s_x – средняя квадратическая погрешность среднего арифметического, %;

N – число данных.

Таблица 4.6 – Результаты опытов и расчетов для определения доверительного интервала выхода и качества концентрата

№ опыта	Содержание железа в к-те $\beta_i, \%$	$(\beta_{cp} - \beta_i)^2, S_{\beta} \%$	Выход концентрата $\gamma, \%$	$(\gamma_{cp} - \gamma_i)^2, S_{\gamma} \%$
1	69,05	0,0025	34,8	0,0676
2	69,15	0,0225	34,4	0,4356
3	68,78	0,0484	35,8	0,5476
4	68,91	0,0081	35,3	0,0576
5	69,11	0,0121	35	0,0036
Ср.	69	0,0234	35,06	0,278
σ		0,153		0,527
Δ		0,189		0,654

Задавшись доверительной вероятностью 95% и числом степеней свободы $f = N - 1 = 4$, определяем $t = 2,776$ и находим доверительный интервал для выхода концентрата:

$$\gamma \pm \Delta = 35,1 \pm 2,776 * 0,527 / 5^{0,5} = 35,1 \pm 0,654\%$$

и содержания железа в концентрате:

$$\beta \pm \Delta = 69,0 \pm 2,776 * 0,153 / 5^{0,5} = 69,0 \pm 0,19\%$$

4.5.3. Проверка адекватности математической модели процесса

ВГСНПМП

Установление адекватности математической модели реальному объекту осуществляется путем непосредственного сравнения выходных величин этого объекта с выходными величинами модели [7].

В общем случае математическая модель считается адекватной, если она позволяет с приемлемой точностью получить интересующие исследователя результаты.

Для проверки адекватности математической модели необходимо выполнить проверку качественного и количественного соответствия получаемых при ее использовании результатов результатам, полученным другими методами.

Если моделирование осуществляется посредством зависимостей, в этом случае проверка адекватности основана на анализе остатков модели, т.е. разностей между расчетными значениями и имеющимися экспериментальными данными. Эти разности должны быть некоррелированными случайными величинами, подчиняющимися нормальному закону распределения с нулевым средним значением. Кроме того, дисперсия остатков должна быть близка к дисперсии погрешности экспериментальных данных.

Такая проверка осуществляется по критерию Фишера

$$F_{\text{ад}} = s^2_{\text{ост}}/s^2_{\text{вос}} \leq F_{\text{табл}},$$

где $s^2_{\text{ост}}$ – остаточная дисперсия, %;

$s^2_{\text{вос}}$ – дисперсия воспроизводимости.

Значения дисперсий воспроизводимости при числе степеней свободы $n = 4$ берем из табл. 4.6.

Дисперсия воспроизводимости содержания Feв концентрате

$$s_{\beta}^2_{\text{вос}} = 0,0234\%\%$$

Дисперсия воспроизводимости выхода концентрата

$$s_{\gamma}^2_{\text{вос}} = 0,0234\%\%$$

Расчет остаточных дисперсий (таблица 4.7) производим на основании сравнения опытных данных (таблица 4.4) и результатов моделирования (таблица 4.5). Число степеней свободы при расчете остаточных дисперсий

$$n = 10 - 3 = 7.$$

Таблица 4.7 - Расчет остаточных дисперсий содержания железа в концентрате (а) и выхода концентрата (б).

Н, кА/м	β_m	$\beta_{оп}$	$S_{\beta^2_{ост}}$	γ_m	$\gamma_{оп}$	$S_{\gamma^2_{ост}}$
3	71,67	71,12	0,3025	2	3,24	1,5376
6	70,92	70,63	0,0841	5,72	4,8	0,8538
9	70,1	69,76	0,1156	13,27	14,12	0,7225
12	69,4	69,55	0,0225	23,70	23,25	0,2060
15	68,77	68,94	0,0289	35,22	33,92	1,6805
20	67,91	68,21	0,09	52,68	53,36	0,4649
25	67,18	66,85	0,1089	66,37	65,68	0,4813
30	66,42	66,78	0,1296	78,70	77,70	1,0064
35	65,46	65,51	0,0025	94,82	95,75	0,8649
40	65,22	65,29	0,0049	99,77	98,58	1,4161
ср. знач.	68,305	68,264	0,1271	47,226	47,04	1,3191
$F_{ад}$			5,4304			4,7451

Определяем $F_{табл}$ при числе степеней свободы $n_1 = 7$ и $n_2 = 4$:

$$F_{табл} = 6,1.$$

Проверяем по критерию Фишера точность совпадения ожидаемых значений содержания железа в концентрате и выхода концентрата, вычисленных на основании разработанной модели, с показателями, полученными опытным путем:

$$F_{ад\beta} = 0,1271/0,0234 = 5,43 < 6,1;$$

$$F_{ад\gamma} = 1,3191/0,278 = 4,75 < 6,1.$$

Расчетные значения критерия Фишера меньше табличного, следовательно, расхождение расчетных и экспериментальных данных находятся в допустимых пределах, и результаты моделирования процесса ВГСНПП можно рассматривать как достоверные.

4.5.4. Выводы

На основании проведенных исследований создана конструкция непрерывно действующего экспериментального сепаратора ВГСНПМП включающая электромагнитную систему, кольцевую высокоградиентную матрицу с большой осадительной поверхностью, необходимой для удержания частиц с наиболее высокой магнитной проницаемостью, а так же привод и устройства загрузки и выгрузки продуктов обогащения. Испытания сепаратора подтвердили теоретически предполагаемые результаты обогащения и позволяют сделать вывод о возможности эффективного применения процесса ВГСНПМП для дообогащения концентрата Михайловского ГОКа.

Глава 5. Рекомендуемая технология обогащения магнетитовых кварцитов МГОКа на основе применения сепаратора ВГСНПМП

Анализ практики обогащения магнетитовых кварцитов [14, 36, 45 - 47, 64, 74, 107] показывает, что результаты магнитного разделения измельченных руд на существующем оборудовании не всегда могут быть признаны удовлетворительными. Особенно низкая селективность разделения на сепараторах типа ПБМ имеет место в первых стадиях обогащения. В магнитных продуктах этих стадий содержится до 50% раскрытых зерен магнетита и до 17-25% раскрытой пустой породы. В последующих стадиях содержание последней в таких продуктах снижается, однако даже в конечном концентрате доля вскрытой пустой породы составляет 2-6%.

Профессор П. Е. Остапенко рассчитал [65], что количество ошламованного необогащаемого сросткового класса, который распределяется равномерно между концентратом и хвостами, определяется произведением площади срастания минералов на средний размер зерна в последней стадии измельчения. Его количество составляет 15-18%, что ставит предел качеству концентрата при шаровом помоле на уровне 65-66%

Fe_{общ}. При разделении в последних стадиях, которое характеризуется высоким содержанием магнетитового железа, как в концентрате, так и в хвостах, это явление фиксируется флокуляцией.

Традиционные пути повышения качества магнетитовых концентратов - это применение более развитых схем магнитной сепарации в каждой стадии для лучшего выведения пустой породы из магнитного продукта, что неизбежно приводит к увеличению числа аппаратов, задействованных в процессе обогащения. В конечном счете, это приводит к увеличению затрат на переработку руды и повышению себестоимости 1т концентрата.

На основе результатов, полученных в ходе выполненных исследований, нами разработана более совершенная технология обогащения магнетитовых руд Михайловского ГОКа с использованием сепараторов ВГСНПМП для получения высококачественных концентратов без снижения нагрузки на секцию.

При разработке схемы за основу была принята технологическая схема обогащения железистых кварцитов ОФ Михайловского ГОКа.

Михайловский ГОК работает на труднообогатимых тонковкрапленных магнетитовых кварцитах [24,60]. Обогащение производится по схеме с шаровым измельчением и стадийным выделением хвостов.

Обогатительная фабрика включает I и II очереди, каждая из которых состоит из 8 технологических секций.

Куски исходной руды крупностью 25-0 мм подаются в приёмные бункеры обогатительной фабрики, откуда по конвейерным питателям они попадают в шаровые мельницы МШР-40×50, установленные на первой стадии измельчения, работающие в паре с односпиральными классификаторами I КСН-30. В каждой секции установлено по четыре бункера. Слив классификаторов первой стадии поступает на I стадию магнитной сепарации, где установлены сепараторы ПБМ-II-120/300. На сливе каждого классификатора установлено по 2 сепаратора.

Продукт магнитной сепарации самотёком поступает в технологический зумпф и насосами 12 ГРК-8 подаётся на вторую стадию классификации, которая протекает в гидроциклонах, хвосты обоих приёмов сепарации удаляются в общефабричный хвостовой поток. Пески гидроциклонов II стадии классификации поступают в мельницу МШРГУ-45×60 II стадии измельчения, работающую в шаровом режиме, слив гидроциклонов направляется на I стадию дешламации, осуществляемую в четырёх дешламаторах МД-5А-03. Измельчённый продукт мельницы II стадии самотёком поступает на II стадию магнитной сепарации, где задействовано 3 сепаратора ПБМ-П-120/300 с противоточными ваннами. Магнитный продукт II стадии поступает в I технологический зумпф и насосами 12ГРК-8 возвращается в гидроциклоны, хвосты попадают в хвостовой поток. Сгущенный продукт I стадии дешламации насосами 8ГРК-8 подаётся на III стадию сепарации, слив дешламаторов удаляется в хвостовой поток. На III стадии сепарации установлено пять спаренных сепараторов ПБМ-ПП-90/250 с полупротивоточными ваннами. Магнитный продукт сепараторов III стадии поступает во II технологический зумпф и насосами 12 ГРК-8 подаётся на III стадию классификации в гидроциклоны, промежуточный продукт III стадии сепарации направляется в I технологический зумпф, хвосты - в хвостовую канаву.

Пески гидроциклонов III стадии классификации поступают в мельницу МШРГУ-45×60 III стадии измельчения, работающую в шаровом режиме, слив гидроциклонов - на II стадию дешламации, где установлено четыре дешламатора МД-5А-03. Измельченный продукт мельницы III стадии поступает в IV стадии сепарации, магнитный продукт IV стадии сепарации направляется во II технологический зумпф и далее на гидроциклоны.

Сгущенный продукт II стадии дешламации насосами 8ГРК-8 подаётся на V стадию сепарации, где установлено семь сепараторов ПБМ-ПП-90/250. Магнитный продукт V стадии обогащения поступает на III стадию дешламации в два дешламатора МД-5А-03, промпродукт - во II

технологический зумпф. Хвосты поступают в хвостовую канаву. Сгущенный продукт III стадии дешламации насосами 5ГРК-8 перекачивается на IV стадию сепарации, сливы дешламаторов поступают в хвостовую канаву. Концентрат VI стадии сепарации обезвоживается на пяти дисковых вакуумных фильтрах ДШ-68-2,5У и системой конвейеров подаётся на склад концентрата и далее на фабрику окомкования или отгружается в железнодорожные вагоны.

По имеющимся открытым данным, ОФ МГОКа производит в среднем 15600 тыс. т. железорудного концентрата в год с содержанием Fe 65,2%.

Потребителями магнитного концентрата МГОКа являются металлургические предприятия, осуществляющие доменный передел. Повысить качество концентрата до требований бездоменной металлургии не удается по следующим причинам.

Шаровый помол до крупности – 44 мкм приводит к образованию значительного количества фракций крупностью -30 мкм. Снижение размеров зерен до 30 мкм и ниже отрицательно сказывается на процессе магнитной сепарации не только потому, что может вызывать потери тонких фракций магнитных минералов вследствие уменьшения магнитной восприимчивости, но и по причине резкого увеличения удельной поверхности и, как следствие, коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r соответственно с $0,4 \div 0,8$ кА/м и 85 Вб/м² до $10 \div 15$ кА/м и 150 Вб/м². Рост остаточной индукции нежелателен, так как вызывает большое загрязнение флокул случайными частицами и увеличение активной силы сцепления - F_c , действующей на сродки магнетита с кварцем. Другими словами, до тех пор, пока снижение крупности происходит в основном за счет разрушения сродков, а не измельчения мономинеральных зерен, удельная остаточная индукция уменьшается. Лишь при переизмельчении мономинеральных частиц остаточная индукция начинает снова резко возрастать, причем тем больше, чем труднее обогатима руда.

Результаты, полученные при испытании экспериментальной модели сепаратора ВГСНППМ (глава 4, таблица 4.2), показали возможность выделения из конечного концентрата МГОКа высококачественного концентрата для бездоменного передела и промпродукта, пригодного для доменного производства.

Это позволяет предложить усовершенствованную технологию обогащения руд МГОКа (рисунок 5.1), согласно которой пески дешламатора III стадии поступают на сепараторы ВГСНППМ (4 шт. на секцию, в т.ч. 1 резервный).

В результате ВГСНППМ - сепарации получают суперконцентрат $\beta_{Fe} = 69,0\%$ и промпродукт $\beta_{Fe} = 64\%$, который дообогащается в V стадии магнитной сепарации до $\beta_{Fe} = 65,2\%$.

Таким образом, внедрение предлагаемой технологии позволит выделить до одной трети конечного концентрата, пригодного для ГБЖ (10% от исходного), и концентрат (23% от исходного), направляемый в доменное производство, что позволит сделать продукцию комбината более конкурентоспособной.

МГОК производит, по собственным данным [60], 15600 тыс.т. концентрата в год со средним содержанием Fe 65,2%. Рыночная стоимость концентрата, содержащего 61-65% Fe составляет 59,5 \$/т, что по текущему курсу составляет 3900р/т. Стоимость концентрата, содержащего 69-70% Fe составляет 6500р/т. Колебания цены связаны с текущими колебаниями спроса и предложения. Экономический эффект применения технологии ВГСНППМ приближенно можно оценить по формуле [81]:

$$\mathcal{E} = M_c C_c + M_d C_d - M C_d - H \sum Z_i - \sum Z_T \quad (5.1)$$

где: \mathcal{E} – экономический эффект, руб.;

M_c – масса суперконцентрата, т;

C_c – цена суперконцентрата, руб.;

M_d - масса доменного концентрата, т;

C_d - цена доменного концентрата, руб;

M – масса производимого фабрикой концентрата, т;

$\sum Z_i$ - сумма затрат на изготовление и установку оборудования, р;

N – норма отчислений на амортизацию основных средств;

$\sum Z_T$ - сумма затрат на текущее обслуживание.

Сумма затрат в свою очередь складывается из затрат на изготовление сепараторов ВГСНППП, капитальных затрат на подготовку площадки и установку сепараторов, подвод коммуникаций, Так как в час фабрика производит 130 т. концентрата, а производительность одного сепаратора 10 т/ч, то для бесперебойной работы фабрики необходимо установить 16 сепараторов (3 запасных). Стоимость одного сепаратора составляет ориентировочно 25 млн.р. Капитальные затраты на установку оборудования составят 400 млн.р. Затраты на заработную плату составят 540 тыс.р./мес. (дополнительно 2 человека в 3 смены), затраты на электроэнергию – 70МВт-ч/мес., другие затраты – 12 млн.р./год. Подставив значения в формулу (5.1), получим ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения сепараторов ВГСНППП на 1 фабрику Михайловского ГОКа:

$$\Delta = 5212 * 6500 + 10423 * 3900 - 15635 * 3900 - 0,15 * 0,8 - 18,8 = 13501,08 \text{ млн.р.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи повышения технико-экономической эффективности обогащения магнетитовых кварцитов путем разработки усовершенствованной конструкции высокоселективного сепаратора для обогащения сильномагнитных руд.

Основные научные выводы и практические результаты, полученные автором, заключаются в следующем:

1. Выполненный анализ мировых достижений науки и техники в области получения высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям бездоменной металлургии стали, позволил обосновать перспективность нового метода магнитного обогащения ВГСНПМП для тонкоизмельченных сильномагнитных руд при получении суперконцентратов для бездоменной металлургии стали.

2. Получено положительное решение Федеральной службы по интеллектуальной собственности о выдаче патента по заявке №2014114166/03(022119) на авторские права по процессу ВГСНПМП.

3. Установлен механизм процесса удаления богатых сростков из слоя магнетитового концентрата, образующегося на осадительных матрицах сепаратора ВГСНПМП. Сущность процесса заключается в том, что в результате наличия гистерезиса перемагничивания у частиц магнетита, циклические изменения полярности переменного поля приводят к диаметрально противоположному изменению направления извлекающей магнитной силы, которая сообщает им вращательное и поступательное движение в области высокого градиента магнитного поля.

Рекомендовано при реализации процесса ВГСНПМП для ослабления флокуляции с целью повышения качества магнетитового концентрата применять переменное магнитное поле частотой 50 Гц и напряженностью не выше 20 кА/м. Оптимальная напряженность 9 – 15 кА/м.

4. Разработана математическая модель нового процесса ВГСНПМП, объективно отражающая закономерности разделения магнитных частиц при его использовании, которая использовалась для разработки конструкции непрерывно действующего экспериментального сепаратора ВГСНПМП и технологической схемы получения высококачественных магнетитовых концентратов основанной на его применении.

5. Создана конструкция экспериментального сепаратора ВГСНПМП с электромагнитной системой, создающей высокоградиентное переменное магнитное поле с низкой напряженностью в ферромагнитных матрицах с

большой поверхностью зоны захвата для улавливания частиц с наиболее высокой магнитной восприимчивостью. Установлены рабочие диапазоны основных конструктивно-технологических параметров сепаратора ВГСНППМП.

6. Предложена конструкция промышленного противоточного сепаратора ВГСНППМП с электромагнитной системой переменного тока и автономной системой регенерации высокоградиентной среды в бесконтактном режиме производительностью по исходному питанию 10 т/ч.

7. Обоснована технология дообогащения магнетитовых концентратов, основанная на применении процесса ВГСНППМП, позволяющая повышать качество магнетитовых концентратов до содержания $Fe_{\text{общ}} = 69\%$ и выше без использования флотации.

8. Предложена технологическая схема получения высококачественных магнетитовых концентратов, соответствующих требованиям к сырью для бездоменной металлургии, включающая операцию ВГСНППМП-сепарации, которая может быть рекомендована для внедрения на Михайловском ГОКе.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии равен 13501,08 млн.р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдохин, В.М. Современное состояние и основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд [Текст] / В.М. Авдохин, С.Л. Губин // Горный журнал.– 2007.- №2. – С.58 – 64.
2. Алейников, Н.А. Структурирование ферромагнитных суспензий[Текст] / Н.А. Алейников, П.А. Усачев, П.И. Зеленов. -Л.: Наука, 1974. - 119 с.
3. Андреев, В.Г. Новые технологии как успех применения усовершенствованной конструкции сепараторов ВСПБМ [Текст] /В.Г. Андреев, В.В. Кармазин // ГИАБ. – 2012. - №9. – С. 223 – 227.
4. Андреев, В.Г. Результаты промышленных испытаний сепаратора ВСПБМ 90/100 на ОФ Михайловского ГОКа [Текст] / В.Г. Андреев, В.В. Кармазин // ГИАБ. – 2012. - №9. – С. 214 – 222.
5. А.с. 831182 СССР, МПК В 03 С 1/00. Способ разделения магнетитовых материалов[Текст]/Зеленова И.М., Сентемова В.А., Зеленов П.И., Ляхов В.П.(СССР). – 2600794/22-03; заявлено 03.04.78;опубл.23.05.81,Бюл. 19. – С.10.
- 6.А.с. 1385373 А1 СССР, МПК 4В 03 С 1/10. Электромагнитный сепаратор [Текст] / Ю.В. Нарижняк, З.П.Армашова, В.Н. Малый (СССР).– 4062438/22-03;заявл. 19.07.1983; опубл. 21.02.1986. Бюл.№ 21.
7. Барский, Л.А. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых [Текст] /Л.А. Барский, В.З. Козин. – М.: Недра, 1978. - 486 с.
- 8.Бочаров, В.А. Технология обогащения полезных ископаемых: В 2 т. Т. 2: Обогащение золотосодержащих руд и россыпей, обогащение руд черных металлов, обогащение горно-химического и неметаллического сырья [Текст] /В.А Бочаров, В.А. Игнаткина. - М: "Руда и Металлы", 2007. - 408 с.
- 9.Варичев, А.В. Крупномасштабное производство железорудной продукции в Российской Федерации [Текст] / А.В Варичев, С.И.Кретов, В.Ф.Кузин. – М.: Горная книга.- 2010. – 395 с.
- 10.Винтайкин, Б.Е. Физика твердого тела [Текст] / Б.Е. Винтайкин. – М.: МГТУ, 2008. – 347 с.

11. Влияние степени обогащения железорудного концентрата на параметры его металлизации [Текст] / А.Л. Разницина, и др // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 8-10.
12. Выделение высококачественного концентрата методом высокоградиентной сепарации в слабых магнитных полях при обогащении магнетитовых руд [Текст] / А.М. Туркенич [и др.] // Обогащения корисних копалин: Наук.-техн. зб.-2005. – Вип.24(65). – С.32-36.
13. Высокоградиентная магнитная сепарация магнетитовых руд [Текст] / А.М. Туркенич [и др.] // Обогащения корисних копалин: Наук.-техн. зб.-2012. – Вип.48(89). – С.89-92.
14. Гзогян, Т.Н. Технологическая оценка рудного сырья на Михайловском ГОКе [Текст] / Т.Н. Гзогян, Л.П. Макуха // Горный журнал.-2002. -№7. -С.73-
15. Горное дело и строительство: Магнитные сепараторы непрерывного действия HGMS. [Электронный ресурс]. / Каталог Metso (Sala). - Режим доступа:
www.metso.ru/ru/miningandconstruction/Mining_Construction_Russia.nsf/, свободный.
16. ГОСТ 26475-85. Продукция железорудная и марганцеворудная. Термины и определения (с Изменением N 1.) [Текст]. Введ. 25.03.1985. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 15 с.
17. Губин, С.Л. Повышение качества магнетитовых концентратов Михайловского ГОКа с применением колонных флотомашин [Текст] / С.Л. Губин // ГИАБ. -2006.- № 7. - С. 355-362.
18. Губин, С.Л. Флотационная доводка магнетитовых концентратов ОАО «Михайловский ГОК» с использованием колонной флотации [Текст] / С.Л. Губин, В.П. Бруев, В.А. Сентемова. // Обогащение руд. -2004. - №5. – С. 10-15.
19. Губин, С.Л. Флотация магнетитовых концентратов катионными собирателями [Текст] / С.Л. Губин, В.М. Авдохин // Горный журнал 2006. - № 7. – С. 80 – 84.

20. Держач, В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых [Текст] / В.Г. Держач. – М.: Недра, 1966. – 385 с.
21. Дунаев, В.А. Минерально-сырьевые ресурсы бассейна КМА [Текст] / В.А. Дунаев // Горный журнал. - 2004.-№1. –С.9-12.
22. Дюбченко, В.А. Перспективы повышения качества железорудного концентрата ОАО «Карельский окатыш» [Текст] / В.А. Дюбченко, Н.А. Патковская, Т.И. Тасина // Обогащение руд. – 2012. – № 6. – С. 7–12.
23. Епугаев, Г.А. Основы аналитической теории взаимодействия минералов с полем сепараторов на постоянных магнитах [Текст] / Г.А. Епугаев. – Владикавказ: Изд-во РИА, 1999. – 320 с.
24. Железорудная база России [Текст] / под ред. Орлова В.П., Веригина М.И., Голивкина Н.И. - М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. - 842 с.
25. Замыцкий В.С. Эксплуатация и ремонт магнитных сепараторов [Текст] / В.С. замыцкий, М.Н. Великий. – М.: Недра, 1977. – 367 с.
26. Каменева, Е. Е. Пути повышения качества магнетитового концентрата ОАО «Ковдорский ГОК» [Текст] / Е. Е. Каменева, Е. Д. Рухленко // Обогащение руд. – 2002. – № 1. – С. 27-31.
27. Кармазин, В.В. Анализ результатов промышленных испытаний экспериментального промышленного сепаратора ВСПБМ-32,5/20 и выдача рекомендаций на проектирование опытно-промышленного сепаратора ВСПБМ-90/100 [Текст] / В.В. Кармазин, Н.Г. Синельникова, И.В. Палин // ГИАБ. – 2009. - № 12. – С. 9 – 14.
28. Кармазин, В.В. Закономерности вращательного движения частиц железосодержащих руд во вращающемся поле барабанного сепаратора на постоянных магнитах [Текст] / В.В. Кармазин, Р.В. Ковалев, Г.А. Епугаев // ГИАБ. – 2007. - №1. – С. 5 – 13.
29. Кармазин, В.В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Том I [Текст] / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. – М.: Издательство МГГУ, 2005. – 669 с.

30. Кармазин, В.В. Перспективы развития технологии обогащения железорудного сырья [Текст] / В. В. Кармазин // Горный журнал. – 2008. – № 12. – С. 70-73.
31. Кармазин, В.В. Повышение качества магнетитовых концентратов [Текст] / В.В. Кармазин, П.А. Сыса // ГИАБ. – 2013. - №12. - С. 136-146.
32. Кармазин, В.В. Повышение качества магнетитовых концентратов за счет высокоградиентной сепарации в переменных магнитных полях с низкой напряженностью [Текст] / В.В. Кармазин, П.А. Сыса // ГИАБ. - 2014. - №2. - С. 123-128.
33. Кармазин, В.В. Получение магнетитовых концентратов для бездомной металлургии путем высокоградиентной сепарации [Текст] / В.В. Кармазин, П.А. Сыса // ГИАБ. – 2013. - №12. - С. 14-20.
34. Кармазин, В.В. Применение высокоградиентной сепарации для повышения качества железорудных концентратов [Текст] / В.В. Кармазин, П.А. Сыса. - Сборник материалов "Неделя горняка 2014". – Москва. - 27-31 января 2014. – М.: Изд. ООО «Роликс», 2014. - С. 151.
35. Кармазин, В.В. Принципы сепарационного массопереноса в турбулентных потоках пульпы, содержащих полидисперсные и гетерогенную твердую фазу [Текст] / В.В. Кармазин, П.И. Пилов // ГИАБ. - 2001. — №4. - С. 148-160.
36. Кармазин, В.В. Разработка технологии стадийного выделения магнетитовых концентратов на основе применения высокоселективных магнитных сепараторов [Текст] / В.В. Кармазин, Н.Г. Синельникова // ГИАБ. - 2006. - №5. – С. 85 -91.
37. Кармазин, В. В. Результаты промышленных испытаний сепаратора ВСПБМ-90/100 на ОФ Михайловского ГОКа [Текст] / В. В. Кармазин, В. Г. Андреев // ГИАБ. – 2012. – № 9. – С. 214-222.
38. Кармазин, В.В. Сепарация в высокоградиентных переменных магнитных полях с низкой напряженностью [Текст] / В.В. Кармазин П.А. Сыса // ГИАБ. - 2014. - №2. - С. 63-66.

39. Кармазин, В.В. Совершенствование технологии обогащения магнетитовых кварцитов на основе сепараторов с бегущим магнитным полем [Текст] / В.В. Кармазин. // Горный журнал. – 2006. – № 6. – С 108-112.
40. Кармазин, В.В. Современные тенденции в использовании минерального сырья [Текст] / В.В. Кармазин. - Сб. «Устойчивое развитие горнодобывающей промышленности».- Кривой Рог: КГТУ, 2004. –С. 37 – 41.
41. Кармазин, В.В. Создание техники для технологии полностадиального обогащения магнетитовых кварцитов [Текст] / В.В. Кармазин, и др. //Горный журнал. – 2010. – № 12. – С 85-89.
42. Кармазин, В.И. Магнитные методы обогащения [Текст] / В.И. Кармазин, В.В. Кармазин. - М.: Недра, 1978. - 255 с.
43. Кармазин, В.И. Магнитные методы обогащения [Текст] / В.И. Кармазин, В.В. Кармазин. - М.: Недра, 1984. - 490 с.
44. Кармазин, В.И. Обогащение руд черных металлов [Текст] / В.И. Кармазин. - М.: Недра, 1982. – 215 с.
45. Кармазин, В.И. Современные методы магнитного обогащения руд черных металлов [Текст] / В.И. Кармазин. - М.: Госгортехиздат, 1962. – С. 151-174.
46. Красуля, Т.С. Повышение эффективности технологии обогащения железистых кварцитов [Текст] / Т.С. Красуля// Горный журнал. –2005. - №1. – с. 7 – 8.
47. Кретов, С.И. Совершенствование технологии переработки руд Михайловского месторождения [Текст] / С.И. Кретов, С.Л. Губин, С.Л. Потапов// Горный журнал. - 2006.-№7.-С. 71-75.
48. Ключин, В.А. Совершенствование технологии обогащения [Текст] / В.А. Ключин, А.В. Остапенко//Горный журнал. - 1996. - № 3. - С.27-32.
49. Ландау, Я. П. Теоретическая физика, Т. 2. Теория поля [Текст]/Я.П. Ландау, Е.М. Лифшиц. - М.: Наука, 1988. – 512 с.
50. Леонов, С. Б. Исследование полезных ископаемых на обогатимость [Текст] /С.Б. Леонов, О.Н. Белькова. - М.:Интернет Инжиниринг, 2001. - 632 с.

51. Липная, Е.Н. Анализ влияния электростатического взаимодействия частиц на процесс флокуляции магнетитового концентрата [Текст] / Е.Н. Липная // ГИАБ. – 2009. - №7. –С. 345-349.
52. Ломовцев, Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд [Текст] / Л.А. Ломовцев, Н.А. Нестерова, Л.А. Дробченко. - М.: Недра, 1979. –267 с.
53. Магнитная восприимчивость малых частиц ферромагнетиков [Электронный ресурс] / В.М. Юров // Современные проблемы науки и образования. – 2009. - № 4. – с. 152-155.. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/>, свободный.
54. Межгосударственный стандарт ГОСТ 10512-93. Сепараторы магнитные и электромагнитные. Общие технические условия [Текст]– М.: Издательство стандартов, 1994. – 26 с.
55. Мостыка, Ю.С. Разработка математической модели процесса улавливания слабомагнитных частиц в шаровой рабочей зоне ВГМС [Текст] / Ю.С. Мостыка, В.Ю. Шутов, И.В. Ахметшина // Теория и практика процессов разделения. – Одесса: ОГМА, 1994. – С. 43-47.
56. Мушкетов, А. А. Повышение качества магнетитового концентрата при помощи комбинированного магнитного поля [Текст] / А.А. Мушкетов, А.Е. Пелевин // Бюллетень «Черная металлургия». – 2014. – № 1. – С. 16 – 18.
57. Мушкетов, А.А. Сравнение технологических показателей разделения в переменном и комбинированном магнитных полях [Текст] / А.А. Мушкетов, А.Е. Пелевин // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: труды науч.-практ. конф. с международным участием и элементами Школы для молодых учёных, 1-4 октября 2013 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: изд-во ООО «УИПЦ», 2013. – С. 394-396.
58. Мясников, Н.Ф. Полиградиентные магнитные сепараторы [Текст] / Н.Ф. Мясников. - М.: Недра, 1973. – 160 с.
59. Новые процессы сепарации в магнитных полях [Текст] / В.В. Кармазин [и др.] - Апатиты, Кольский филиал АН СССР, 1982. –С. 34-51.

60. ОАО «Михайловский горно-обогатительный комбинат» [Текст] / Основные показатели работы фабрик за 2010 год. Сборник отчетов, Железногорск, 2010.-38 с.
61. Обзор рынка железорудного сырья (железная руда, концентрат, агломерат и окатыши) в России. ИНФОМАЙН. [Электронный ресурс]/Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов, металлургии и химической промышленности. - М.:Издание 3-е, август, 2010. – 208с.– Режим доступа: [www. infomine. ru/](http://www.infomine.ru/), свободный.
62. Обогащение железных руд и производство окатышей в Австралии [Текст] / Л.А. Рейтаровская [и др.] // Обзорная информация. Сер. Обогащение руд. – М.:ЦНИИТЭИЧМ, 1981. – Вып. 1. – 37 с.
63. Овчинников, И.К. Теория поля [Текст] / Овчинников И.К. – М.: Недра, 1979. – 352 с.
64. Остапенко, П.Е. Обогащение железных руд [Текст] / Остапенко П.Е. - М.: Недра, 1985. - 271 с.
65. Остапенко, П.Е. Влияние стадийности на показатели обогащения вкрапленных магнетитовых руд [Текст] /П.Е. Остапенко, В.В. Кармазин // Обзорная информация. – М.: ЦНИИТЭИЧМ. – 1976. - сер. 2. -вып.6. - 21 с.
66. Палин, И.В. Новые технологии как успех применения сепаратора ВСПБМ 90/100 [Текст] / Палин И.В.// ГИАБ. - №6. – 2009. – С.124 – 127.
67. Патент 2365421 Российская Федерация, МПК В03С1/247. Магнитный сепаратор [Текст] / Кретов С. И. [и др.] - № 2008114626/03; заявл. 17.04.08; опубл. 27.08.09, Бюл. № 11. – 3 с.
68. Патент 57157 Украина, МКВ В 03С1/30. Способ мокрой высокоградиентной сепарации тонкодисперсных магнетитовых руд и устройство для его осуществления [Текст] / Туркенич А.М. - №2001021245; заявл. 21.02.2001; опубл. 16.06.2003, Бюл. №8.-4 с.
69. Патент 2366511 Российская Федерация, МПК В03В7/00, В03С1/00. Способ обогащения железосодержащих руд [Текст] / Кармазин В.В., Синельникова Н.Г., Палин И.В., Гзогян Т.Н.; заявитель и

патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный горный университет». – № 2008114625/03; заявл. 17.04.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25. – 3 с.

70. Патент 2535722 С2 Российская Федерация, МПК В03С1/00.Способ получения высококачественного магнетитового концентрата [Текст]/. ГзогянТ.Н., Гзогян С.Р., Винников В.А., Чантурия Е.Л.; заявитель и патентообладатель НИТУ «МИСиС».- №2012130836/03, заявл. 19.07.2012; опубл. 27.01.2014,Бюл.№3. – 4 с.

71. Пелевин,А.Е. Возможность использования сепарации в переменном магнитном поле для стадийного выделения концентрата [Текст] / А.Е. Пелевин, А.А. Мушкетов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф., 4-13 апреля 2011г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2011 – С. 89-93.

72. Пелевин, А.Е. Испытания грохотов «DERRICK STACK SIZER» на ОФ КГОК «Ванадий» [Текст] /А.Е. Пелевин// Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф., 26-30 мая 2008 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: Изд-во Форт Диалог-Исеть, 2008. - С. 41-42.

73. Пелевин, А.Е. Стадийное выделение железного концентрата [Текст] / А.Е. Пелевин // Обогащение руд. – 2007. – № 3. – С. 10-15.

74. Пелевин, А.Е. Технология обогащения магнетитовых руд и пути повышения качества железных концентратов [Текст] / А.Е. Пелевин, // Горный журнал УГГУ. – 2011. - №4. - С. 20 - 28

75.Пирогов, Б.И. Геолого-минералогические факторы, определяющиеобогатимость железистых кварцитов[Текст]/ Б.И Пирогов.- М.: Недра, 1969.-240 с.

76. Плаксин, И.Н. Новые направления глубокого обогащения тонковкрапленных железных руд [Текст] / И.Н. Плаксин [и др.] - М.:Наука,1964. – 203 с.
77. Поперечникова,О.Ю. Интенсификация флотационной технологии доводки магнетитовых концентратов [Текст] / О.Ю. Поперечникова, А.С. Сизых, С.П. Нагаева // Горный журнал. – 2014. - №11. – С. 75 – 78.
78. Примеры расчетов по гидравлике[Текст] / Д.А. Альтштуль [и др.] - М.: Стройиздат, 1975. – 168 с.
79. Пути повышения качества магнетитовых концентратов ОАО «Южный ГОК» [Текст] / Ю.Г. Викул [и др.] // Горный журнал. – 2001. - № 1. – С. 48-50.
80. Разработка мокрых магнитных сепараторов для стадийного выделения концентрата на обогатительных фабриках современных горно-обогатительных комбинатов[Текст] / В.В.Кармазин [и др.]//ГИАБ. - №12. – 2005. – С. 49 – 59.
81. Разумов, К.А. Проектирование обогатительных фабрик[Текст]/К.А. Разумов, В.А. Перов. – М.: Недра, 1982 – 503с.
82. Расчет картины поля магнитной системы сепаратора типа ПБМ с клиновыми магнитными вставками[Текст]/ В.В. Кармазин [и др.]// ГИАБ. – 2007. - № 7. – С.56 – 62.
83. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания [Текст] / А. Н. Горский [и др.] - М.: Радио и связь, 1988. – 165с.
84. Ревзина, Н.С. Обогащение железных руд и окомкование железорудных концентратов в Канаде [Текст] / Н.С. Ревзина, Н.И. Мещерякова // Обзорная информация. Сер. Обогащение руд. – М.:ЦНИИТЭИЧМ, 1982. – Вып. 1. – 56 с.
85. Ревнивцев, В.И. Селективное разрушение минералов [Текст] / В.И. Ревнивцев, Л.П. Зарогатский. - М.: Недра.- 1988. – 286 с.

86. Результаты лабораторных исследований по выделению высококачественного концентрата методом высокоградиентной магнитной сепарации при обогащении магнетитовых руд ЦГОКа [Текст] / А.М. Туркенич [и др.] //Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб.-2006. – Вип.27(66)-28(67). – С.64-67.
87. Роджерс, К. Укладки и покрытия [Текст] / К. Роджерс; под ред. Г.М. Ильичева. - М.: Мир, 1968. – 134с.
88. Рубинштейн, Ю.Б. Математические методы в обогащении полезных ископаемых [Текст] /Ю.Б. Рубинштейн, Л.А. Волков. – М.: Недра, 1987. – 296 с.
89. Сентемова, В.А. Испытания флотационной технологии повышения качества железных концентратов [Текст] / В.А. Сентемова// Обогащение руд. - 2009. - №3. – С.17 – 21.
- 90.Сентемова, В.А. Совершенствование технологии обогащения на АзГОКс применением сепараторов 2ГТБС-90/250[Текст]/ В.А. Сентемова, Л.В. Смирнова, А.Б. Мухтаров// Обогащение руд.-1986. - №3.-С.11-13.
91. Сепаратор для мокрого магнитного обогащения тонкозернистых магнетитовых руд: пат. 53737 Украина, МКВ ВОЗС 1/30 [Текст] / А.М. Туркенич. - №2000031221; заявл. 01.03.2000; опубл. 17.02.2003, Бюл. №2.-3.с.
92. Синельникова, Н.Г. Повышение эффективности обогащения магнетитовых кварцитов на основе применения сепараторов с комбинированной амплитудно-частотной модуляцией магнитного поля [Текст] / Н.Г. Синельникова. – М.: РГБ ОД, 2009.- 149 с.
93. Синельникова, Н.Г. Технология обогащения магнетитовых кварцитов ОАО «Лебединский ГОК» с применением высокоселективного мокрого магнитного сепаратора ВСПБМ-32,5/20 [Текст] / Н.Г. Синельникова//ГИАБ. - 2009. - № 12. - т. 14.
94. Слоэн, Н. Дж. А. Упаковка шаров. [Электронный ресурс] / Н. Дж. А. Слоэн // Scientific American. - Издание на русском языке. – 1984. -№ 3. - С.72–82.. – Режим доступа: <http://egamath.narod.ru/Nquant/Spheres.htm>, свободный.

95. Соколова, В.П. Использование дефлокуляции и предварительной гидрофобной флокуляции для повышения эффективности магнитного обогащения тонковкрапленных магнетитовых кварцитов [Текст] / В.П. Соколова//Збагачення корисних копалин. - 2014. - Вип. 56(97). – С.37 – 40.
96. Сухорученков, А.И. Тонкое грохочение – высокоэффективный метод повышения технико-экономических показателей обогащения тонковкрапленных магнетитовых руд [Текст] / А.И. Сухорученков, В.В. Стаханов, Г.В. Зайцев // Горный журнал.- 2001. - № 4. - С.48-50.
97. Сыса, П.А. Извлечение плотных минералов в активном слое гидравлических шлюзов [Текст] / П.А. Сыса, В.В.Кармазин, Н.И. Закиева// ГИАБ. – 1997. - №5. - С. 63-66.
98. Сыса, П.А. Получение сырья для бездоменного производства стали на основе повышения эффективности магнитного обогащения [Текст] / П.А. Сыса, В.В.Кармазин //Сборник материалов "Конгресс обогатителей стран СНГ 2015". Москва 17-19 февраля 2015. - М: Изд. ООО «ИНТЕП». - 2015. - С. 43.
99. Сыса, П.А. Получение сырья для бездоменного производства стали на основе повышения эффективности магнитного обогащения [Текст] / П.А. Сыса, В.В. Кармазин//Тезисы докладов научного симпозиума "Неделя Горняка 2015". Москва 25-29 января 2015. - М: Изд. МГГУ. 2015. - С. 181.
100. Сыса, П.А. Сепарация в высокоградиентных магнитных полях с низкой напряженностью [Текст]/ П.А. Сыса, В.В. Кармазин//Материалы десятой всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии". - Старый Оскол 25-27 ноября 2013. - Белгород: Изд. НИУ «БелГУ», 2013. - С. 200.
101. Теоретические и экспериментальные исследования путей снижения серы и кремнезема в высококачественных концентратах ОФ ЛГОКа – сырья для бездоменного производства стали [Текст] / В.В. Кармазин [и др.] // ГИАБ. – 2007. - №10. – С. 271 – 278.

102. Тихонов, О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогатительной технологии [Текст]/ О.Н. Тихонов. – Л.: Недра, 1980. - 240 с.
103. Тихонов, О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых [Текст] / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1984. - 208 с.
104. Турдахунов, М. М. Освоение высокочастотного грохота корпорации Derrick на ОАО «ССГПО» [Текст] / М. М Турдахунов, и др. // Горная промышленность. – 2002. – № 4. – С.76 – 79.
105. Туркенич, А.М. Расчет интенсивности извлечения полезного компонента в концентрат [Текст] /А.М. Туркенич // Обогащение полезных ископаемых: Науч.-техн. сб. - 1970. – Вып. - С. 34-39.
106. Усачев П.А. Магнитно-гравитационное обогащение руд [Текст] / П.А. Усачев, А.С. Опалев. – Апатиты, РАН, Кольский НЦ, Горный институт, 1993.
107. Чантурия, В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава [Текст] / В.А. Чантурия// ГИАБ. – 2009. - №12. – том 15. - С. 9 - 25.
108. Чантурия, В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России/ В.А. Чантурия[Текст] // Горный журнал. – 2005. - № 12. - С.56-64.
109. Электроимпульсное кондиционирование магнетитовых концентратов [Текст] / Е.Н. Липная [и др.]// ГИАБ. – 2010. - №5. – С. 58 – 62.
110. Allen, N.R. Low intensity rotating magnetic field separation[Text] / N.R. Allen// In: Proc. Int. Con. Min Proc. Extr. Metal. MINPREX 2000, Melbourne, Australia.-2000.- P. 303.
111. Allen, N.R. Mineral particle rotation measurements for magnetic rotation separation [Text] / N.R.Allen//Magn. Electr. - Sep. 11.- 2002. - P. 136.
112. Augusto, P.A. Innovation features of a new magnetic separator and classifier [Text] / P.A. Augusto, J.P.Martins// Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. - Vol. 22. - Nos. 1-3 (2001). –P. 155.

113. Improving Concentrate Quality in the Concentrators of Zambia Consolidated Copper Mines Limited Using Column Cells [Text] / E.P. Smithson [et al.] // Column 91. - Int. conf. On column Flotation. – Subbury. - June 2-6. - 1991.
114. Inversion of the breakthrough curve of HGMF: Theory and experiment. Industrial application of magnetic separation [Text] / H.K. Collan [et al.] // IEEE Publ. – № 78CH144-2 MAG, 1978 - P.175.
115. Ferrari, R.L. An introduction to electromagnetic fields [Text] / R.L. Ferrari. - New-York: Van Nostrand Reinhold, 1975.
116. Laurila, E.A. Magnetic flocculation and demagnetization [Text] / E.A. Laurila// In: SME Mineral Processing Handbook. – SME. - New York (USA). - 1985. - P. 6-43.
117. Processing of Iron Ore by Reverse Column Flotation [Text] / E.C. Dowling [et al.]// Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress, Rome Juli 23-27, 2000, vol. B, Oral Session, P. 163-170.
118. Silvester, P.P. Modern electromagnetic fields [Text] / P.P. Silvester. - Englewood cliffs, N. J. - Prentice-Hall, 1986.
119. Svoboda, J. A realistic description of the process of high-gradient magnetic separation [Text] / J. Svoboda// Minerals Engineering. - Vol.14. -№11. - 2001.
120. Svoboda J. A theoretical approach to the magnetic flocculation of weakly magnetic minerals [Text] / J. Svoboda //Int. J. Miner. Process.- №8. – 1981. - P.146.